



**João Carlos de Melo
Ferreira**

**Estudo do Efeito Transiente em Amplificadores de
Raman**

**Study of the Transient Effect in Raman Fiber
Amplifiers**



**João Carlos de Melo
Ferreira**

**Estudo do Efeito Transiente em Amplificadores de
Raman**

**Study of the Transient Effect in Raman Fiber
Amplifiers**



**João Carlos de Melo
Ferreira**

**Estudo do Efeito Transiente em Amplificadores de
Raman**

**Study of the Transient Effect in Raman Fiber
Amplifiers**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Física, realizada sob a orientação científica do Professor Armando N. Pinto e co-orientação do Professor Paulo André.

Thesis submitted to the University of Aveiro for the degree of Master in Physics Engineering, under the supervision of Professor Armando N. Pinto and Professor Paulo André.

o júri / the jury

Presidente / President

Doutor Fernão Rodrigues Vístulo de Abreu

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Vogais / Examiners committee

Doutor Adolfo Cartaxo

Professor Associado do Instituto Superior Técnico

Doutor Armando Nolasco Pinto

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro (Orientador)

Doutor Paulo Sérgio de Brito André

Professor Auxiliar Convidado da Universidade de Aveiro e Investigador Auxiliar do Instituto de Telecomunicações (Co-orientador)

**agradecimentos /
acknowledgements**

“Nenhum Homem é uma ilha...” Nesse sentido também este trabalho resultou do contributo de vários amigos, tanto a nível profissional como pessoal. Seria impossível mencionar todos eles, assim sendo, apenas vou referir aqueles cujas contribuições foram mais substanciais.

Quero começar por agradecer ao meu orientador, Professor Armando N. Pinto, pela oportunidade que me deu para trabalhar no Instituto de Telecomunicações. Quero agradecer a orientação, a paciência e comentários sempre atentos.

Ao professor Paulo André por toda a disponibilidade e interesse que demonstrou ao longo do meu trabalho. Apoiando-me sempre que solicitado.

Aos colegas do Instituto de Telecomunicações, pela fácil integração e disponibilidade para ajudar.

Queria também agradecer ao consórcio Telesal e à Nokia Siemens Networks, por terem criado as condições para que este trabalho possa ter sido realizado.

Quero fazer um agradecimento especial a todos os amigos que me aturaram em momentos menos felizes e que, apesar de tudo, se mantiveram ao meu lado...

A todos, o meu mais sincero obrigado.

João Ferreira

palavras-chave

Comunicações Ópticas, Amplificador de Raman, Efeito Transiente

resumo

Este trabalho teve como objectivo estudar o efeito transiente em amplificadores de fibra óptica baseados no efeito de Raman.

Foi implementado um simulador baseado nas equações de propagação para o regime dinâmico nos amplificadores de Raman. Simulador esse que foi validado experimentalmente para um esquema de bombeamento contra-propagante, obtendo-se uma boa concordância entre os resultados simulados e os experimentais.

Foram efectuados diversos estudos com o objectivo de perceber quais os parâmetros do amplificador com mais impacto na intensidade e dinâmica do efeito transiente. Com base nesses estudos uma nova configuração para um amplificador de Raman foi obtida e uma solução para controlar/mitigar o efeito transiente foi proposta.

keywords

Optical Communications, Raman Amplifiers, Transient Effect

abstract

The scope of this work was the study of transient effect in optical amplifiers based on the Raman effect.

A simulator was implemented based on the time dynamic propagation equations for the Raman amplifier. Based on this simulator, the transient effect for a counter-pumped Raman amplifier was studied and experimentally tested, obtaining a good agreement between the two approaches.

Several studies were made with the purpose of identifying the parameters with high impact on the intensity and dynamics of the transient effect. From that study a new configuration for a Raman amplifier was obtained and a technique capable of mitigating the transient effect in the surviving channels was proposed.

“Agir, eis a inteligência verdadeira. Serei o que quiser. Mas tenho que querer o que for. O êxito está em ter êxito, e não em ter condições de êxito. Condições de palácio tem qualquer terra larga, mas onde estará o palácio se não o fizerem ali?”

— Bernardo Soares no Livro do
Desassossego

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Objectivos e Organização da Dissertação	2
1.2	Contribuições do Trabalho	3
2	Estado da Arte	5
2.1	Modelação do Efeito Transiente	5
2.2	Mitigação/Compensação do Efeito Transiente	6
2.2.1	Mitigação no Domínio Óptico	6
2.2.2	Mitigação com Recurso a Dispositivos Eléctricos	10
3	Modelo Matemático	13
3.1	Implementação Numérica	14
3.1.1	Determinação do Regime Estacionário	14
3.1.2	Determinação Regime Dinâmico	18
3.2	Validação Experimental do Modelo	20
3.2.1	Regime Estacionário	20
3.2.2	Regime Dinâmico	21
3.3	Conclusão	22
4	Estudo do Efeito Transiente	23
4.1	Diferentes Esquemas de Bombeamento	23
4.2	Diferentes Potências da Bomba	24
4.3	Diferentes Comprimentos de Fibra	25
4.4	Diferentes Potências dos Canais de Entrada e Número de Canais Removidos	26
4.5	Comportamento de uma Cascata de Amplificadores de Raman	27
4.5.1	Simulação de 3 Amplificadores em Cascata com 600 mW, 400 mW e 200 mW	28
4.6	Conclusão	30
5	Proposta para um Amplificador de Raman	31
5.1	Amplificador de Raman com Reflexão da Potência da Bomba	32
5.1.1	Condições Fronteira	32
5.1.2	Cenários de Simulação	33
5.1.3	Diferentes Comprimentos da Fibra	39
5.2	Técnica para Mitigar o Efeito Transiente em Amplificadores de Raman com Reflexão de Bomba	40

5.2.1	Técnica de Mitigação	40
5.2.2	Comportamento do Amplificador com Reflexão de Bomba e Controlo de Transientes	42
5.3	Conclusão	43
6	Conclusão	45
6.1	Conclusões Finais	45
6.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	46

Lista de Figuras

1.1	Reconfiguração na rede no instante t	2
2.1	Ganho do amplificador em função da potência de entrada para o sinal 1550 nm, com ou sem restrição do ganho pelo uso de redes de Bragg, canal ressonante 1544 nm	7
2.2	Esquema de um anel de fibra	8
2.3	Esquema para a cavidade ressonante com redes de Bragg	9
2.4	Potência à saída do amplificador para o sinal 1550 nm ao longo do tempo para os casos com e sem restrição de ganho	10
3.1	Fibra dividida em pequenos segmentos Δz	15
3.2	Representação pictórica de um amplificador	16
3.3	Fluxograma do ciclo principal da simulação	17
3.4	Esquema do regime dinâmico de um amplificador à fibra	19
3.5	Configuração experimental para estudar o regime estacionário	20
3.6	Ganho de Raman para diferentes bombas	21
3.7	Configuração experimental para estudar o regime dinâmico	21
3.8	Flutuação de potência ao longo do tempo para o canal 1555 nm, resultados experimentais (verde) e simulados (tracejado)	22
4.1	Flutuações de potência e ganho on/off de diferentes esquemas de bombeamento	24
4.2	Flutuação de potência no sinal sobrevivente, 1550 nm em função do tempo, para $P_p^- = 400, 600, 800$ mW	25
4.3	Flutuação de potência no sinal sobrevivente, 1550 nm, em função do tempo, para diferentes comprimentos de fibras	26
4.4	Flutuação de potência no sinal sobrevivente em função do tempo, para diferentes potências de entrada e número de canais removidos	27
4.5	Evolução da potência do sinal 1550 nm ao longo dos três amplificadores, antes de ocorrer a adição/remoção dos sinais	28
4.6	Evolução da potências das bombas contra-propagantes ao longo dos 3 amplificadores, antes da adição/remoção dos sinais	29
4.7	Flutuação de potência do sinal sobrevivente ao longo de três amplificadores	29
5.1	Esquema do um amplificador a) Contra-propagante e b) co-propagante de um RFA com uso da rede de Bragg	32

5.2	Ganho de um RFA para o sinal 1550 nm em função da potência de entrada, para o amplificador com e sem a rede de Bragg; $L_{SMF} = 40$ km; $\lambda_p = 1450$ nm; $\lambda_s = 1550$ nm	34
5.3	Variação de potência em função de tempo para o sinal sobrevivente, 1550 nm, para diferentes esquemas de bombeamento contra-propagantes, quando 2 de 3 sinais são adicionados/removidos; $L_{SMF} = 40$ km; $\lambda_p = 1450$ nm; $P_{p,in} = 700$ mW; $\lambda_s = 1550, 1551, 1552$ nm; $P_{s,in} = 0$ dBm/channel	35
5.4	Evolução temporal da potência da bomba reflectida pela rede de Bragg no caso do amplificador contra-propagante (Figura 5.1(a)) e co-propagante (Figura 5.1(b)), quando 2 de 3 sinais são adicionados/removidos; $L_{SMF} = 40$ km; $\lambda_p = 1450$ nm; $P_{p,in} = 700$ mW; $\lambda_s = 1550, 1551, 1552$ nm; $P_{s,in} = 0$ dBm/channel	36
5.5	Curva de ganho para os amplificadores contra-propagantes com 625 mW e uma rede de Bragg Figura 5.1(a) e o amplificador co-propagante 635 mW com uma rede de Bragg Figura 5.1(b), em função do potência de entrada; $L_{SMF} = 40$ km; $\lambda_p = 1450$ nm; $\lambda_s = 1550$ nm; $P_{s,in} = 0$ dBm	37
5.6	Potência da bomba reflectida pela rede de Bragg para um amplificador contra-propagante com 625 mW com a rede de Bragg Figura 5.1(a) e para o amplificador co-propagante com 635 mW com a rede de Bragg Figura 5.1(b), em função da potência de entrada; $L_{SMF} = 40$ km; $\lambda_p = 1450$ nm; $\lambda_s = 1550$ nm	37
5.7	Variação da potência do sinal 1550 nm em função do tempo, para diferentes potências de bombeamento, quando 2 de 3 sinais são adicionados/removidos, para diferentes potências de bomba; $\lambda_p = 1450$ nm; $\lambda_s = 1550$ nm, 1551 nm, 1552 nm; $P_{s,in} = 0$ dBm por sinal	38
5.8	Δ Ganho <i>on/off</i> entre um amplificador contra-propagante com uma rede de Bragg e o respectivo amplificador sem rede de Bragg, em função do comprimento da fibra; $\lambda_p = 1450$ nm; $P_{p,in} = 600$ mW; $\lambda_s = 1550$ nm; $P_{s,in} = 0$ dBm	39
5.9	Diagrama esquemático de um amplificador contra-propagante com controlo de transientes	41
5.10	Diagrama do sistema de controlo	41
5.11	Variação de potência do sinal sobrevivente, 1550 nm, em função do tempo, com e sem a técnica de mitigação, para o amplificador contra-propagante com a rede de Bragg; $L_{SMF} = 40$ km; $\lambda_p = 1450$ nm; $P_{p,in} = 700$ mW; $\lambda_s = 1550$ nm, 1551 nm, 1552 nm; $P_{s,in} = 0$ dBm/sinal.	42

Lista de Acrónimos

AON	redes ópticas dinâmicas [<i>Agile Optical Networks</i>]
AOGC	<i>All-Optical Gain Clamped</i>
APA	<i>Average Power Analysis</i>
ASE	espalhamento de Raman espontâneo [<i>Amplified Spontaneous Emission</i>]
BER	razão de erro de bit [<i>Bit-Error Ratio</i>]
DCF	fibra para compensação da dispersão [<i>Dispersion Compensating Fiber</i>]
EDFA	amplificador de fibra dopada com Érbio [<i>Erbium-Doped Fiber Amplifiers</i>]
OSNR	relação sinal-ruído óptico [<i>Optical Signal-to-Noise Ratio</i>]
RFA	amplificadores de Raman [<i>Raman Fiber Amplifiers</i>]
ROADM	<i>Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer</i>
SMF	fibra padrão monomodo [<i>Standard Monomode Fiber</i>]
SRS	espalhamento de Raman estimulado [<i>Stimulated Raman Scattering</i>]
WDM	multiplexagem por divisão no comprimento de onda [<i>Wavelength-Division Multiplexing</i>]

CAPÍTULO 1

Introdução

A tecnologia de multiplexagem por divisão no comprimento de onda [*Wavelength-Division Multiplexing*] (WDM) possibilita uma elevada taxa de transferência de informação. Com o surgimento do *Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer* (ROADM) é possível fazer a gestão da largura de banda no domínio óptico, possibilitando a implementação de redes ópticas dinâmicas [*Agile Optical Networks*] (AON). Estas redes possuem a particularidade de se poderem reorganizar a nível da camada óptica, ligando ou desligando canais. Permitindo um maior grau de liberdade para optimização da largura de banda, consoante as necessidades dos utilizadores. Contudo, devido à adição/remoção de canais ópticos, ocorrem variações abruptas de potência à entrada dos sistemas de transmissão que se traduz numa flutuação de potência nos restantes canais, ditos sobreviventes. Este efeito é chamado de transiente.

Num sistema WDM são os amplificadores ópticos os principais responsáveis pelo aumento de intensidade do efeito transiente. Os amplificadores de Raman com as suas vantagens relativamente ao amplificador de fibra dopada com Érbio [*Erbium-Doped Fiber Amplifiers*] (EDFA), nomeadamente largura de banda [KRN⁺99] e baixo ruído [Bro04], apresentam-se como uma tecnologia emergente e com potencial para ser usada nas redes ópticas de próxima geração. Serão, então, os dispositivos a estudar. Os transientes nos sistemas WDM surgem quando um ou mais canais são adicionados/removidos. Devido ao facto de os amplificadores de Raman saturarem com base na potência total de entrada, uma variação desta vai provocar flutuações de potência nos canais sobreviventes, ou seja, quando alguns sinais são removidos à entrada do amplificador, vai fazer com que os restantes canais, sobreviventes, sofram uma variação no ganho, resultando numa flutuação de potência destes canais. O regime transiente é definido, então, como a variação de potência nos canais sobreviventes quando existe a adição/remoção de um ou mais canais na rede.

Na Figura 1.1 pode-se observar um esquema de uma rede óptica dinâmica. Assim, se no instante t ocorrer uma reconfiguração da rede a nível da camada óptica (o sinal verde é reencaminhado para o nó 5), o sinal vermelho, apesar de se manter inalterado, vai sofrer flutuações de potência à saída do amplificador. Durante o regime transitório, se a potência dos canais sobreviventes flutuar, estes podem deixar de ser correctamente detectados no receptor. Como o efeito transiente é potenciado pelos amplificadores ópticos, se até ao nó 3 existirem

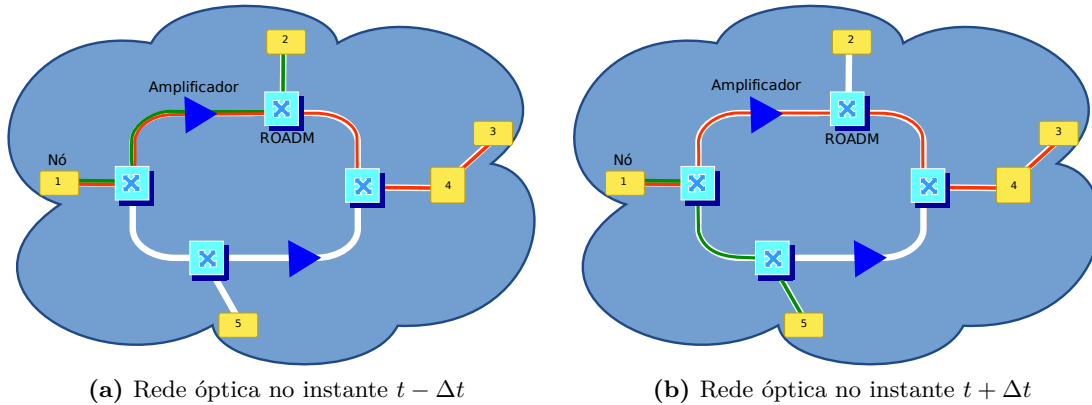


Figura 1.1: Reconfiguração na rede no instante t

mais amplificadores, essas flutuações de potência vão aumentar de intensidade à medida que o sinal se propaga através dos amplificadores.

Estas flutuações poderão degradar a informação transportada pelos sinais, impondo uma séria limitação à implementação e evolução deste tipo de redes. É este o principal motivo para estudar o efeito transiente em amplificadores Raman. Pretende-se perceber e encontrar estratégias de mitigação que permitam compensar as flutuações de potência devidas à adição/remoção de canais, para que a informação transportada se mantenha inalterada.

1.1 Objectivos e Organização da Dissertação

O objectivo deste trabalho é estudar e perceber o efeito transiente nos amplificadores Raman, encontrando os factores que potenciam o efeito. Qualquer estudo só fará sentido se alguma proposta para melhorar o sistema daí advir. Será, então, o segundo objectivo deste trabalho, usar o conhecimento adquirido do estudo para encontrar estratégias para mitigar/compensar o efeito transiente, contribuindo para o desenvolvimento das comunicações ópticas com encaminhamento a nível da camada óptica.

No capítulo 2 é apresentada uma pesquisa bibliográfica, com o propósito de dar uma perspectiva geral sobre o que já foi estudado em relação a este tema. Apresentam-se e estudam-se também algumas técnicas de mitigação do efeito transiente nos amplificadores de Raman [*Raman Fiber Amplifiers*] (RFA).

No capítulo 3, é apresentado o modelo matemático que descreve o comportamento dos sinais e bombas de um RFA e explicado o algoritmo desenvolvido para construir o simulador. No final do capítulo apresenta-se a validação experimental do simulador, de forma a perceber se a realidade está a ser correctamente representada.

No capítulo 4, apresenta-se um estudo sobre o comportamento do transiente em vários cenários de utilização do RFA, com o objectivo de identificar quais os parâmetros com mais impacto no efeito transiente. Usa-se o simulador desenvolvido para discutir e perceber o comportamento do transiente. Simulam-se assim vários cenários de operação possíveis para um amplificador e o seu comportamento numa cascata de amplificadores.

1.2. CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

No capítulo 5 é apresentado um estudo, no regime dinâmico, de um amplificador com reflexão da potência da bomba, de modo a perceber as vantagens e desvantagens desta configuração. Uma solução para mitigar o efeito transiente nos amplificadores com reflexão da potência da bomba é também apresentada e discutida.

As conclusões e algumas considerações são apresentadas no capítulo 6.

1.2 Contribuições do Trabalho

Na opinião do autor, algumas das principais contribuições deste trabalho foram:

- Desenvolvimento e implementação de um modelo, no regime dinâmico, do amplificador Raman, com a capacidade de simular o seu comportamento em diversas condições fronteira, cenários de operação e várias técnicas de mitigação;
- Estudo do comportamento no regime dinâmico do amplificador Raman, com a enumeração dos aspectos que mais contribuem para as flutuações de potência dos sinais sobreviventes;
- Estudo, no regime dinâmico, do uso de uma rede de Bragg para aumentar a eficiência do amplificador Raman;
- Apresentação de uma nova configuração para a criação de um amplificador de Raman eficiente e de baixo custo, adequado a redes ópticas com encaminhamento a nível da camada óptica.

CAPÍTULO 2

Estado da Arte

TRABALHOS apresentados sobre o estudo das interações entre sinais e bombas nos amplificadores de Raman e da dinâmica temporal do amplificador revelaram a existência do efeito transiente, apresentando este efeito como relevante em redes com encaminhamento na camada óptica. Uma das primeiras observações do efeito foi feita em 2001 [CW01], usando uma fibra para compensação da dispersão [*Dispersion Compensating Fiber*] (DCF) como meio de amplificação.

Apresentam-se em seguida alguns dos estudos mais importantes sobre o efeito transiente e sobre técnicas de mitigação já desenvolvidas.

2.1 Modelação do Efeito Transiente

Em [CW01] considera-se um sistema WDM equipado com um RFA com bombeamento contra-propagante. Os autores mostraram que, se a potência de entrada aumentar (devido à adição rápida de sinais), a frente de onda dos sinais vão experimentar um ganho igual ao se não houvesse adição de sinais, consumindo a energia da bomba à medida que se propagam. Como resultado, os sinais posteriores não serão amplificados com o mesmo ganho e a potência à saída diminuirá, resultando na criação de um pico de potência seguida de uma diminuição de potência nos canais sobreviventes.

Em [Gra02] os autores experimentalmente concluíram que o efeito transiente deve-se à combinação de dois fenómenos:

- Flutuações de potência devido à modulação cruzada do ganho. Como o ganho do amplificador satura com base na potência total de entrada, a adição/remoção de canais faz com que o ganho no amplificador não seja constante ao longo do tempo, provocando flutuações de potência nos canais sobreviventes;
- Devido às interações sinal-sinal, nomeadamente devido ao espalhamento estimulado de Raman entre sinais. Este faz com que a potência dos sinais sobreviventes flutue aumentando ou diminuindo consoante a posição relativa dos sinais que são adiciona-

dos/removidos. Este tipo de flutuação de potência é muito rápido, aproximadamente 100 ns, e de baixa intensidade.

Em [KM02a], são apresentados estudos sobre a influência da alteração de alguns parâmetros do amplificador de Raman como é o caso das potências das bombas, potência dos sinais à entrada da fibra e diferentes comprimentos de fibra. Os autores detectaram experimentalmente flutuações de potência da ordem dos 0.45 dB, concluindo que as flutuações de potência apesar de muito significativas são inferiores às dos amplificadores EDFA.

Em [GC07] faz-se um estudo teórico, de modo a perceber o comportamento dos transientes numa cascata de seis amplificadores. Foram efectuadas simulações, de forma a encontrar as posições óptimas para colocar os dispositivos que permitem compensar e mitigar as flutuações de potência.

Em [KVR07] é estudada uma ligação de três amplificadores em série com um total de 383 km. Foram detectados transientes da ordem de 1.3 dB à saída do último amplificador da cascata, mas mostra-se que não há perda da qualidade da transmissão, desde que as potências das bombas em cada amplificador sejam ajustadas. A potência do sinal no final de cada amplificador deverá ser da ordem de -10 dBm e a sensibilidade do receptor ajustada 6 dB acima do valor nominal para a sensibilidade do receptor.

Em [MJL⁺07] foi investigado o comportamento dos transientes num amplificador de Raman com bombeamento de segunda ordem. Neste último, uma bomba com um comprimento de onda mais curto e uma maior potência alimenta uma bomba com uma potência menor e com um comprimento de onda maior, que por sua vez irá amplificar os sinais, conseguindo-se assim reduzir o ruído e a influência das bombas sobre os sinais. Foi estudado também uma técnica de compensação/mitigação no domínio óptico.

2.2 Mitigação/Compensação do Efeito Transiente

As técnicas de mitigação existentes podem ser separadas em duas categorias, estando na base dessa distinção o recurso, ou não, a dispositivos eléctricos. No caso de não se usar dispositivos eléctricos, são chamadas de *All-Optical Gain Clamped* (AOGC).

2.2.1 Mitigação no Domínio Óptico

Existem pelo menos duas técnicas conhecidas para implementar uma mitigação no domínio óptico. Uma consiste em re-injectar uma percentagem de um comprimento de onda escolhido na entrada da fibra, formando um anel de fibra [MJGJ05]. A outra técnica consiste em usar duas redes de Bragg [TNL03; GC07]. Estas técnicas de mitigação baseiam-se em reflectir ou re-injectar um comprimento de onda específico, de modo a criar uma cavidade óptica ressonante, sendo este canal um comprimento de onda que não transportará nenhuma informação. A potência do comprimento de onda escolhido vai aumentar até ser atingido um regime estacionário, consumindo recursos da bomba, restringindo, assim, o ganho do amplificador para os sinais.

Num amplificador sem nenhuma estratégia de mitigação, retirando-se sinais ao sistema diminui-se a potência de entrada no amplificador, ou seja, ficará mais potência da bomba

2.2. MITIGAÇÃO/COMPENSAÇÃO DO EFEITO TRANSIENTE

disponível para amplificar os sinais sobreviventes, fazendo com que estes experimentem um ganho maior ao longo do amplificador, aumentando assim a potência dos sinais sobreviventes à saída do amplificador. Com a cavidade ressonante, este canal, visto que sofre sucessivas passagens na fibra de amplificação, vai consumir os recursos da bomba, absorvendo essa flutuação de potência, fazendo com que o ganho permaneça constante para os sinais sobreviventes ao longo do amplificador.

Como se pode verificar pela Figura 2.1, à medida que se aumenta a reflectividade das redes de Bragg ou se usa uma maior percentagem de sinal re-injectado, vai aumentar-se a restrição do ganho, diminuindo o ganho dos sinais, o que pode ser considerado uma desvantagem deste método de mitigação. Nesta situação, mesmo que a potência de entrada varie, devido à adição/remoção de sinais, neste caso entre 4.8 dBm e 0 dBm (correspondendo à remoção de 2 sinais em 3 e 0 dBm de potência cada), a variação do ganho à saída do amplificador vai ser mais reduzida, como evidenciado Figura 2.1.

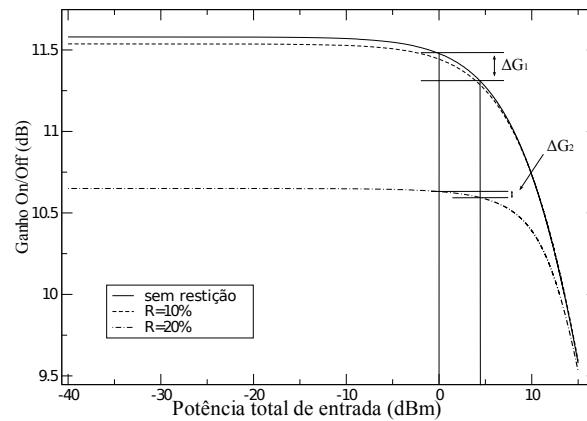


Figura 2.1: Ganho do amplificador em função da potência de entrada para o sinal 1550 nm, com ou sem restrição do ganho pelo uso de redes de Bragg, canal ressonante 1544 nm

Assim, como se pode verificar, a potência dos sinais de entrada é um factor muito importante a ter em consideração. Um dos objectivos na construção e aplicação deste método de mitigação, será fazer com que a variação da potência total de entrada, antes e depois da remoção dos sinais, se situe sempre na região com menor declive da curva do ganho em função da potência de entrada. A escolha das respectivas condições de re-injecção ou reflectividade varia consoante a configuração do amplificador e o ganho pretendido.

Outro factor com elevada relevância é o comprimento de onda seleccionado para construir a cavidade ressonante. O facto de se inserir um canal extra no amplificador vai influenciar o comportamento de todos os outros devido ao espalhamento de Raman na fibra. O impacto deste canal vai variar, dependendo da distância relativa entre comprimentos de onda. A escolha do comprimento de onda para criar uma cavidade de ressonância deverá recair num comprimento de onda que cause um menor impacto na curva de ganho do amplificador de Raman em função dos comprimentos de onda. Deve ser um comprimento de onda em que a diferença para o ganho dos sinais no amplificador sem este método de mitigação seja a menor possível.

De facto, a escolha de todos estes parâmetros não pode ser feita ao acaso. Torna-se necessário estudar de uma forma sistemática o problema para melhor se conseguir adaptar os parâmetros a cada situação.

Anel de Fibra

Na Figura 2.2 é apresentado um esquema representando um anel de fibra. O anel é criado re-injectando uma percentagem da potência de um canal escolhido, da saída da fibra de novo para o início. Variando-se a percentagem dos acopladores DC1 e DC2 controla-se a potência re-injectada, o que vai estar directamente relacionado com o grau de restrição de ganho. O filtro óptico selecciona o comprimento de onda que será re-injectado. E o isolador, ISO, evita que a espalhamento de Raman espontâneo [*Amplified Spontaneous Emission*] (ASE) contra-propagante seja re-injectada de novo no amplificador. No final da fibra, o sinal que se pretende acompanhar é seleccionado pelo filtro e é detectado num osciloscópio, OSC.

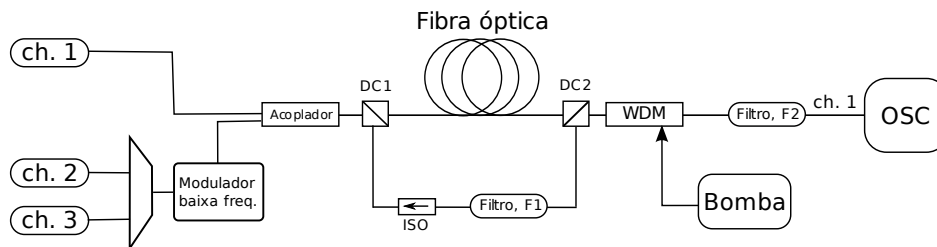


Figura 2.2: Esquema de um anel de fibra

Em [MJGJ05] conseguiram uma redução de efeito de 1.7 dB para 0.35 dB para um comprimento de onda re-injectado de 1537.5 nm sendo esse comprimento de onda retirado da ASE do sistema. Concluíram que a restrição do ganho e a mitigação do transiente depende do comprimento de onda que é re-injectado no anel laser e da potência de entrada dos sinais, tal como já foi anteriormente escrito. Mostra-se assim que para criar sistema de realimentação óptico pode-se recorrer à ASE do sistema, permitindo desta forma evitar colocar mais um laser no sistema.

Como se pode perceber a implementação prática deste tipo de solução só funciona quando o amplificador de Raman possui a entrada e a saída do amplificador no mesmo espaço físico. Se se optar por fazer amplificação ao longo da fibra de transmissão a instalação de outra fibra para fazer re-injecção de sinal não é uma solução viável.

Cavidade Ressonante Com o Uso Redes de Bragg

Neste esquema de mitigação, Figura 2.3, usam-se duas redes de Bragg, uma no início e outra no final do amplificador, para reflectir sucessivamente uma percentagem de um comprimento de onda, criando-se uma cavidade de ressonância óptica.

2.2. MITIGAÇÃO/COMPENSAÇÃO DO EFEITO TRANSIENTE

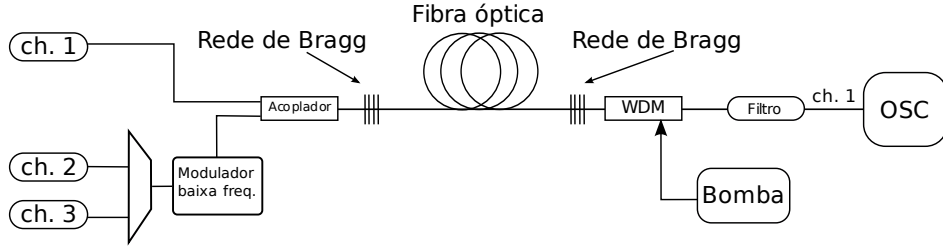


Figura 2.3: Esquema para a cavidade ressonante com redes de Bragg

As condições fronteira do sistema para o canal escolhido para criar a cavidade óptica são [GC]:

$$\begin{aligned} P^+(0, t, \nu) &= R_1 P^-(0, t, \nu) \\ P^-(L, t, \nu) &= R_2 P^+(L, t, \nu), \end{aligned} \quad (2.1)$$

onde $P^+(0, t, \nu)$ é a potência do canal para o sentido co-propagante no início da fibra e $P^-(L, t, \nu)$ a potência do canal no sentido contra-propagante no final da fibra; R_1 e R_2 é o quociente de reflexão das redes de Bragg na posição $z=0$ e $z=L$ respectivamente; ν a frequência do canal reflectido e t o tempo.

No simulador desenvolvido, descrito no capítulo 3, foi também incluído esta técnica de mitigação. Assim, foram simulados diferentes cenários de mitigação, nomeadamente com diferentes percentagens de reflectividade das fibras de Bragg, o comprimento de onda escolhido para criar a cavidade ressonante foi o de 1544 nm. Por uma questão de simplicidade usou-se o mesmo factor de reflexão para as duas redes de Bragg. Simulou-se um amplificador contra-propagante com uma bomba de 1450 nm com 600 mW de potência e uma fibra padrão monomodo [*Standard Monomode Fiber*] (SMF) de 20 km. Usaram-se três sinais 1550 nm, 1551 nm, 1552 nm provocando-se a remoção dos dois últimos com uma frequência de 250 Hz.

Na Figura 2.4 é apresentada a evolução do canal 1550 nm à saída do amplificador para as situações sem mitigação, e com a reflectividade das redes de Bragg de 10% e 20%. Como se pode verificar, à medida que se aumenta a reflectividade, diminui-se efectivamente a flutuação de potência. Mas ao fazer isto está a diminuir-se o ganho dos sinais. É necessário encontrar um compromisso entre a flutuação máxima permitida e o ganho que se pretende obter com o amplificador.

Este método traz a vantagem de poder ser aplicado em amplificadores de Raman que usam a fibra de transmissão como meio de amplificação, bastando para isso inserir redes de Bragg no início e final do amplificador com um índice de reflectividade de acordo com os objectivos.

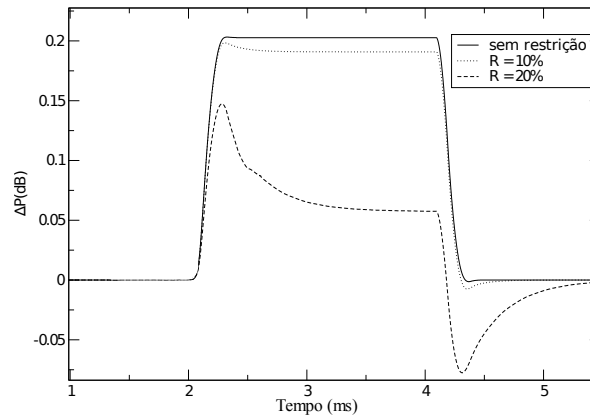


Figura 2.4: Potência à saída do amplificador para o sinal 1550 nm ao longo do tempo para os casos com e sem restrição de ganho

2.2.2 Mitigação com Recurso a Dispositivos Eléctricos

Para implementar uma mitigação com recurso a dispositivos eléctricos foi reportada uma técnica [CYW⁺01; KM02b]. O controlo dos transientes pode ser feito com recurso a dispositivos eléctricos para monitorizar o comportamento dos amplificadores. Esta monitorização pode ser efectuada directamente sobre os sinais do sistema ou usando especificamente um ou mais canais que servem apenas de canais de prova. Note-se que os sinais que estão a ser monitorizados não podem ser removidos da rede, senão perde-se a informação desses sinais, limitando a possibilidade de reconfiguração da rede.

Controlo das Potências das Bombas

Usando a informação retirada pela monitorização dos canais de prova pode implementar-se um algoritmo que permita controlar directamente a potência da bomba. Quando a potência de um canal sobrevivente aumenta, o sistema de controlo diminuirá a potência da bomba, de modo a compensar o aumento de potência dos sinais devido à remoção de sinais, fazendo com que à saída do amplificador o sinal sobrevivente flutue o mínimo possível.

Em [CYW⁺01] os autores obtiveram, num sistema sem controlo, variações entre 0.35 dB e 1.2 dB com adição/remoção de 4/8 a 20/24 sinais em amplificadores Raman. Com o mecanismo de controlo, essas flutuações mantiveram-se abaixo de 0.06 dB, tendo conseguido eficazmente mitigar as flutuações de potência nos canais sobreviventes.

Em [KM02b] os autores testaram esta técnica para um grande número de sinais e múltiplas bombas. Usaram um modelo com 100 sinais, começando em 1520 nm com um 1 nm de espaçamento entre dois sinais consecutivos e -3 dBm por canal de potência de entrada e oito bombas com um comprimento de onda de 1416 nm, 1421 nm, 1426 nm, 1432 nm, 1440 nm, 1456 nm, 1473 nm e 1502 nm. Na situação em que se remove os últimos 50 canais, verificaram que era impossível mitigar as flutuações de potência apenas com a monitorização de um sinal. Para efectivamente conseguirem bons resultados é necessário monitorizar pelo menos dois sinais, cada um deles responsável por metade das bombas. Assim, usando a informação do sinal 1520 nm controlaram as primeiras quatro bombas e com o sinal 1540 nm as últimas quatro

2.2. MITIGAÇÃO/COMPENSAÇÃO DO EFEITO TRANSIENTE

bombas. Concluíram que com a escolha correcta para o coeficiente de ganho proporcional C_p e o coeficiente de diferenciação C_d , de acordo com a teoria de controlo, as flutuações de potência podem ser mantidas abaixo dos 0.1 dB, independentemente do número de canais adicionados/removidos.

Uma desvantagem deste sistema é o tempo de resposta. De facto, entre a leitura de uma flutuação de potência, actuação na bomba e o controlo da subida do transiente podem decorrer alguns milissegundos, o que é inaceitável para um amplificador co-propagante. Contudo, em [ZMM05], os autores mostraram ser possível aplicar este sistema de controlo em amplificadores co-propagantes, usando mecanismo de controlo muito rápido. Evidenciaram que era possível retirar 40 sinais ao sistema e manter as flutuações de potência abaixo dos 0.15 dB.

Percebe-se que à medida que se aumenta o número de bombas e sinais, mais complexo será o mecanismo de mitigação a aplicar ao sistema, sendo necessário usar mais canais de monitorização e algoritmos mais complexos para conseguir efectivamente mitigar as flutuações de potência nos canais sobreviventes. Uma vantagem deste método de mitigação é o facto de não restringir o ganho, permitindo assim uma maior eficiência do amplificador.

CAPÍTULO 3

Modelo Matemático

As equações que descrevem a evolução no espaço e no tempo dos canais co-propagantes e contra-propagantes são dadas de acordo com [KRN⁺99],

$$\begin{aligned}
\frac{\partial P^\pm(z, \nu, t)}{\partial z} \mp \frac{1}{v_g(\nu)} \frac{\partial P^\pm(z, \nu, t)}{\partial t} = & \mp \alpha(\nu) P^\pm(z, \nu, t) \pm \gamma(\nu) P^\mp(z, \nu, t) \\
& \pm \sum_{\zeta > \nu} \left\{ \frac{g_R(\nu - \zeta)}{K_{eff} A_{eff}} [P^\pm(z, \zeta, t) + P^\mp(z, \zeta, t)] P^\pm(z, \nu, t) \right. \\
& \pm h\nu \frac{g_R(\nu - \zeta)}{A_{eff}} [P^\pm(z, \zeta, t) + P^\mp(z, \zeta, t)] \left[1 + \frac{1}{e^{h(\zeta - \nu)/kT} - 1} \right] d\nu \Big\} \\
& \mp \sum_{\zeta < \nu} \left\{ \frac{\nu g_R(\nu - \zeta)}{\zeta K_{eff} A_{eff}} [P^\pm(z, \zeta, t) + P^\mp(z, \zeta, t)] P^\pm(z, \nu) \right. \\
& \mp 2h\zeta \frac{g_R(\nu - \zeta)}{A_{eff}} [P^\pm(z, \zeta, t) + P^\mp(z, \zeta, t)] \left[1 + \frac{1}{e^{h(\nu - \zeta)/kT} - 1} \right] d\zeta \Big\}, \quad (3.1)
\end{aligned}$$

onde $P^+(z, \nu, t)$ e $P^-(z, \nu, t)$ são as potências ópticas dos canais co-propagantes e contra-propagantes respectivamente; $\alpha(\nu)$ é o coeficiente de atenuação da fibra; $\gamma(\nu)$ é o coeficiente do espalhamento contra-propagante de Rayleigh; K_{eff} é factor de polarização entre os sinais e as bombas; A_{eff} é a área efectiva da fibra; $v_g(\nu)$ é a velocidade de grupo; $g_R(\nu - \zeta)$ é o coeficiente do ganho de Raman entre as frequência ν e ζ ; h é a constante de Planck; k a constante de Boltzman e T a temperatura absoluta da fibra.

Os primeiros dois termos do lado direito são referentes à atenuação da fibra e ao espalhamento contra-propagante de Rayleigh. O terceiro termo refere-se ao ganho devido ao espalhamento de Raman estimulado [*Stimulated Raman Scattering*] (SRS), enquanto que o quinto termo se refere as perdas pelo mesmo efeito. Os quarto e sexto termos representam a ASE, a sua dependência com a temperatura e amplificação devido à emissão estimulada de Raman.

De modo a reduzir o tempo de computação não se consideram os termos que contribuem para a criação e amplificação do ruído. Esta aproximação é válida tendo em consideração que a

potência da ASE à saída do amplificador é pequena quando comparada com a potência gerada pela SRS. Pode-se, portanto, simplificar a Equação 3.1, retirando-lhe os termos referentes aos efeitos enunciados anteriormente:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P^\pm(z, \nu, t)}{\partial z} \mp \frac{1}{v_g(\nu)} \frac{\partial P^\pm(z, \nu, t)}{\partial t} = & \mp \alpha(\nu) P^\pm(z, \nu, t) \\ & \pm \sum_{\zeta > \nu} \left\{ \frac{g_R(\nu - \zeta)}{K_{eff} A_{eff}} [P^\pm(z, \zeta, t) + P^\mp(z, \zeta, t)] P^\pm(z, \nu, t) \right\} \\ & \mp \sum_{\zeta < \nu} \left\{ \frac{\nu}{\zeta} \frac{g_R(\nu - \zeta)}{K_{eff} A_{eff}} [P^\pm(z, \zeta, t) + P^\mp(z, \zeta, t)] P^\pm(z, \nu, t) \right\}. \end{aligned} \quad (3.2)$$

Obtém-se uma expressão que descreve a evolução das potências ao longo da fibra e do tempo para os vários sinais e bombas, tendo em conta apenas a atenuação da própria fibra e as interações bomba-bomba, bombas-sinal e sinal-sinal devido à SRS.

3.1 Implementação Numérica

Para resolver este sistema de equações pode-se usar o método de Runge-Kutta, ou o *Average Power Analysis* (APA) [MLP00]. Na construção deste simulador utilizou-se uma solução onde se expande o método APA para o domínio temporal [GC07] por ser computacionalmente mais eficiente. Por simplificação e clareza, o simulador foi separado em duas partes:

- Determinação do regime estacionário, definindo-se este como sendo a distribuição de potências quando no sistema não existe qualquer alteração na potência dos sinais à entrada da fibra, ou seja, quando todos os sinais estão ligados;
- Determinação do regime dinâmico, ou seja, o cálculo das potências para os vários sinais e bombas ao longo do intervalo tempo. É nesse intervalo temporal que se provoca a variação das potências dos sinais, adição/remoção, com o tempo.

Assim, a primeira parte da simulação gera a distribuição de potências para todos os canais no regime estacionário, distribuição essa que é usada como condição inicial para o regime dinâmico. No regime dinâmico, é provocada uma variação das potências de entrada dos sinais na fibra, de acordo com os objectivos pretendidos para cada simulação, determinando-se a potência dos canais ao longo da fibra em função do tempo.

O simulador desenvolvido é genérico, de modo a permitir estudar diversos cenários de operação, como por exemplo: diferentes esquemas de bombeamento de energia para o amplificador; várias configurações de canais WDM; vários comprimentos de fibra e janelas temporais, etc.

3.1.1 Determinação do Regime Estacionário

Para obter a distribuição de potências no regime estacionário para todos os sinais e bombas, coloca-se na Equação 3.2 a derivada em ordem ao tempo igual a zero. Obtém-se um sistema

3.1. IMPLEMENTAÇÃO NUMÉRICA

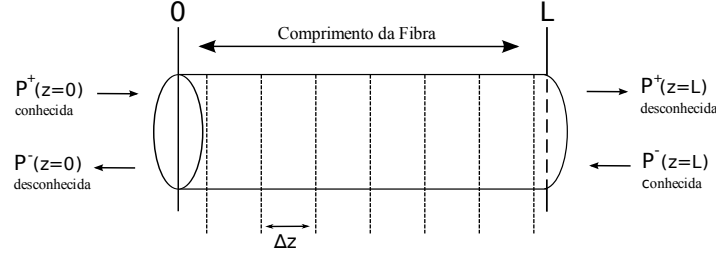


Figura 3.1: Fibra dividida em pequenos segmentos Δz

acoplado de equações diferenciais não lineares que descreve a propagação dos sinais e bombas ao longo da fibra, Equação 3.3.

$$\begin{aligned} \frac{dP^\pm(z, \nu, t)}{dz} = & \mp \alpha(\nu) P^\pm(z, \nu, t) \\ & \pm \sum_{\zeta > \nu} \left\{ \frac{g_R(\nu - \zeta)}{K_{eff} A_{eff}} [P^\pm(z, \zeta, t) + P^\mp(z, \zeta, t)] P^\pm(z, \nu, t) \right\} \\ & \mp \sum_{\zeta < \nu} \left\{ \frac{\nu g_R(\nu - \zeta)}{\zeta K_{eff} A_{eff}} [P^\pm(z, \zeta, t) + P^\mp(z, \zeta, t)] P^\pm(z, \nu, t) \right\}. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Para resolver a Equação 3.3 numericamente, usando o método APA, é necessário discretizar o comprimento do amplificador em várias seções de tamanho Δz , tal como é apresentado na Figura 3.1. Assim, considera-se que o amplificador está dividido em $M = L/\Delta z$ seções de amplificação, em que L é o comprimento da fibra. O amplificador é modelado como a concatenação destes pequenos segmentos. Cada segmento é pequeno o suficiente para se considerar a potência constante. Assim, à saída de cada segmento de amplificação tem-se:

$$P_{out}^\pm = P_{in}^\pm G(z, \nu). \quad (3.4)$$

A potência de cada canal à saída de cada seção é igual à potência de entrada dessa seção multiplicada pelo ganho dessa seção, onde $G(z, \nu)$ é dado por:

$$G(z, \nu) = \exp[\{A(\nu) - B(\nu) - \alpha(\nu)\}z], \quad (3.5)$$

em que $A(\nu)$ e $B(\nu)$ são retirados da Equação 3.3, de acordo com a seguinte igualdade:

$$A(z, \nu) = \sum_{\zeta > \nu} \frac{g_R(\nu - \zeta)}{K_{eff} A_{eff}} [P^\pm(z, \zeta) + P^\mp(z, \zeta)], \quad (3.6)$$

$$B(z, \nu) = \sum_{\zeta < \nu} \frac{g_R(\nu - \zeta)}{K_{eff} A_{eff}} [P^\pm(z, \zeta) + P^\mp(z, \zeta)]. \quad (3.7)$$

Devido ao facto de se estar a considerar a divisão do amplificador em secções de amplificação ao longo do seu comprimento, em que a potência ao longo de cada secção é constante pode estabelecer-se $A(z, \nu)$ e $B(z, \nu)$ iguais a $A(\nu)$ e $B(\nu)$ respectivamente, em cada secção do amplificador. As potências de cada canal são também substituídas por potências médias em cada secção, com o objectivo de diminuir o factor de erro, através da expressão:

$$\langle P(\nu) \rangle = P_{in}^{\pm}(\nu) \frac{G(\nu) - 1}{\ln G(\nu)}, \quad (3.8)$$

onde $P_{in}(\nu)$ é a potência que chega ao segmento e $G(\nu)$ é dado pela Equação 3.5.

Sabendo a expressão que calcula a potência à saída de cada secção de amplificação, Equação 3.4, para se saber qual a potência à saída do amplificador basta percorrer sucessivamente todas as secções de amplificação.

Em seguida é apresentada uma representação pictórica de um amplificador, representação essa que será usada para explicar o algoritmo implementado:

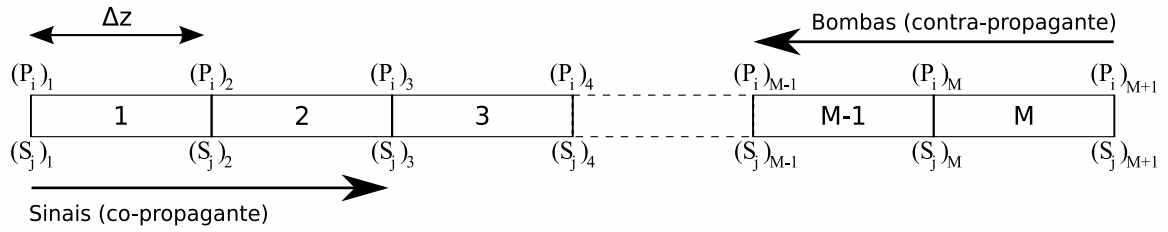


Figura 3.2: Representação pictórica de um amplificador

Observe-se a Figura 3.2 onde é apresentada uma representação pictórica de um amplificador. A fibra é dividida em M secções de comprimento Δz , são injectados vários sinais S_j no sentido co-propagante, à entrada da fibra, e várias bombas P_i no sentido contra-propagante, à saída da fibra, como condições iniciais sabe-se que:

- $(S_j)_1$ é a potência à entrada da fibra, quando $z = 0$, para o sinal j ;
- $(P_i)_{M+1}$ é a potência das bombas contra-propagantes quando $z = L$, em que L é o comprimento da fibra, para a bomba i .

Para calcular a distribuição de potências no regime estacionário, tendo por base a Equação 3.4, tem-se:

$$\begin{aligned} S_j^+(z_{m+1}, \nu_j) &= S_j^+(z_m, \nu_j) G(z_m, \nu_j) \\ P_i^-(z_{m+1}, \nu_i) &= P_i^-(z_m, \nu_i) / G(z_m, \nu_i), \end{aligned} \quad (3.9)$$

onde $S_j^+(z_{m+1}, \nu_j)$ é a potência dos sinais co-propagantes na secção $m + 1$, $S_j^+(z_m, \nu_j)$ a potência dos sinais na secção m e $G(z_m, \nu_j)$ o ganho na secção m para o sinal j ; $P_i^-(z_{m+1}, \nu_i)$ é a potência das bombas na secção $m + 1$, $P_i^-(z_m, \nu_i)$ é a potência das bombas na secção m e $G(z_m, \nu_i)$ o ganho da secção m para a bomba i .

Como se pode constatar, quando se pretende calcular o ganho da secção z_m é necessária a informação sobre a distribuição das potências dos outros canais nessa secção, Equação 3.8.

3.1. IMPLEMENTAÇÃO NUMÉRICA

Caso todas as bombas e sinais sejam co-propagantes essa informação está disponível (é o resultado do cálculo anterior). Mas, caso seja um sistema contra-propagante, como é o caso deste exemplo, o algoritmo terá de ser diferente porque a informação da distribuição de potência dos canais contra-propagantes, ao longo da fibra, não está disponível aquando do cálculo da distribuição de potências para o sentido co-propagante.

Uma forma de resolver este problema é recorrer a um processo iterativo para actualizar sucessivamente os valores da distribuição de potência para os canais co- e contra-propagantes, até os valores convergirem e ser atingida uma determinada tolerância entre eles. Um fluxograma do algoritmo é apresentado na Figura 3.3.

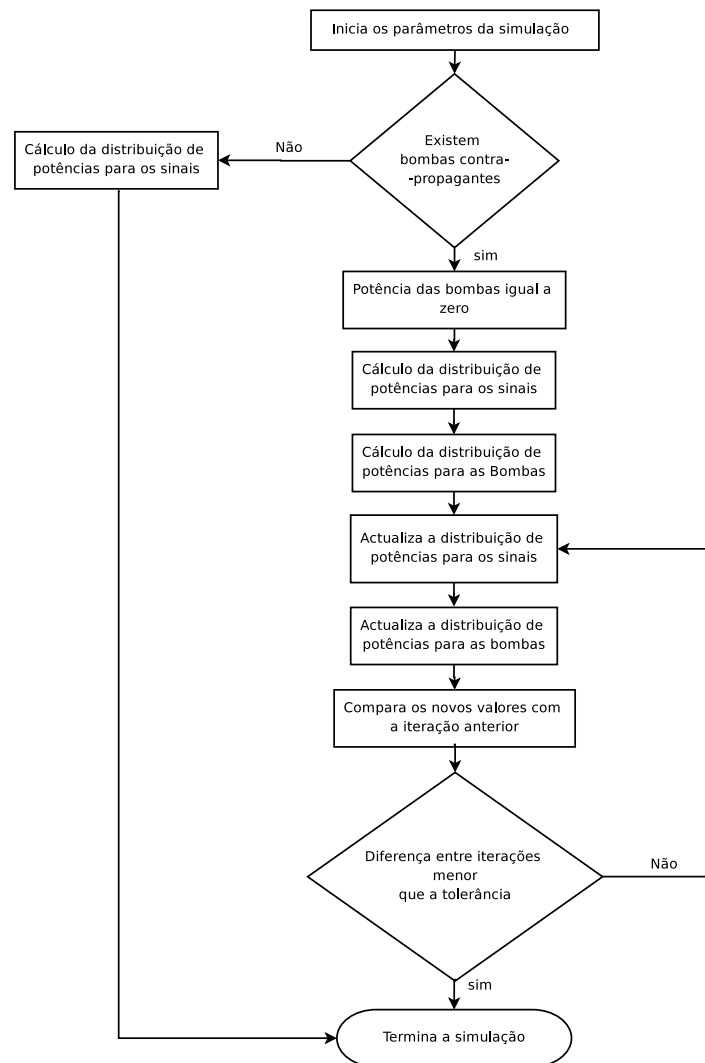


Figura 3.3: Fluxograma do ciclo principal da simulação

No final desta simulação obtém-se a distribuição de potências de todos os sinais e bombas, para todas as secções da fibra. Sendo possível perceber a evolução da potência destes ao longo da fibra, bem como as potências à saída da fibra, podem também ser feitos diversos cálculos usando essas informações como, por exemplo, o ganho *on/off* dos sinais.

No regime estacionário determina-se a distribuição de potências para todos os sinais e bombas, ao longo da fibra, quando não há variação das condições iniciais, ou seja, quando não há alteração da potência de entrada dos vários sinais. Obtém-se no final do cálculo, uma matriz de potências cujas linhas são os diferentes sinais e bombas (P_i e S_j) e as colunas cada secção da fibra. Como já explicado anteriormente, os resultados do regime estacionário serão usados como condições iniciais para a determinação do regime dinâmico.

3.1.2 Determinação Regime Dinâmico

Para compreender o modelo é necessário perceber o comportamento dos sinais e bombas ao longo do tempo no interior da fibra. Tendo por base por base o modelo apresentado para descrever o regime estacionário, o amplificador é dividido em M secções de comprimento Δz . Com o decorrer do tempo, os sinais e bombas vão evoluindo de secção para secção, até que, passado um tempo, $\tau = L/v_g$, saem da fibra. Assim, fazendo $\Delta t = \tau/M$ irá obter-se o tempo que cada sinal demora a percorrer cada secção, estando Δz e Δt relacionados pela forma $\Delta z = v_g \Delta t$. Dividindo-se o intervalo de tempo em que se pretende correr a simulação, pelo tempo que o sinal demora a percorrer cada secção, irão obter-se N secções de tempo. Pode-se facilmente perceber que por cada incremento unitário Δt , os canais deslocam-se uma posição Δz de acordo com o sentido de movimento. Fazendo Δt e Δz suficientemente pequenos, pode-se assumir uma distribuição constante de potência quer em Δt como em Δz , assim a potência óptica em cada secção do tempo e espaço é dada por [GC07]:

$$\begin{aligned} P^+(z_{m+1}, t_{n+1}, \nu) &= P^+(z_m, t_n, \nu) G(z_m, t_n, \nu) \\ P^-(z_{m+1}, t_{n+1}, \nu) &= P^-(z_m, t_n, \nu) / G(z_m, t_n, \nu), \end{aligned} \quad (3.10)$$

onde P^+ representa a potência dos canais co-propagante e P^- representa os canais contra-propagante, m e n representam secções de distância e tempo, respectivamente e $G(z_m, t_n, \nu)$ o ganho da secção z_m no instante t_n .

As expressões apresentadas em Equação 3.10 são semelhantes às equações descritas na Equação 3.9, diferindo apenas na adição de uma nova dimensão, o tempo. Toda a base teórica e de funcionamento do modelo é igual ao explicado no regime estacionário.

Depois de determinar a distribuição de espacial de potências ao longo da fibra para o regime estacionário, usam-se os valores de cada secção para determinar a evolução temporal das potências ao longo da fibra. Ou seja, a matriz distribuição de potências obtida no regime estacionário fornece a distribuição de potências em $t = 0$. Resta determinar a evolução temporal das potências dos canais em cada secção, ao longo da fibra.

Na Figura 3.4 é apresentada uma representação da evolução temporal de um amplificador.

Estando Δz e Δt relacionados, garante-se por cada intervalo de tempo Δt , os sinais e bombas avançam um Δz na fibra de acordo com o seu sentido de movimento. Na prática, no instante de tempo de n para $n + 1$ os sinais co-propagantes deslocam-se da secção m para a secção $m + 1$ e as bombas contra-propagantes de m para $m - 1$. Isto acontece para todas as secções para cada incremento de tempo Δt .

A escolha do tamanho das secções tanto temporal como espacial não é ao acaso. Acaba por ser um compromisso entre precisão de resultados e tempo de cálculo. Verifica-se que para,

3.1. IMPLEMENTAÇÃO NUMÉRICA

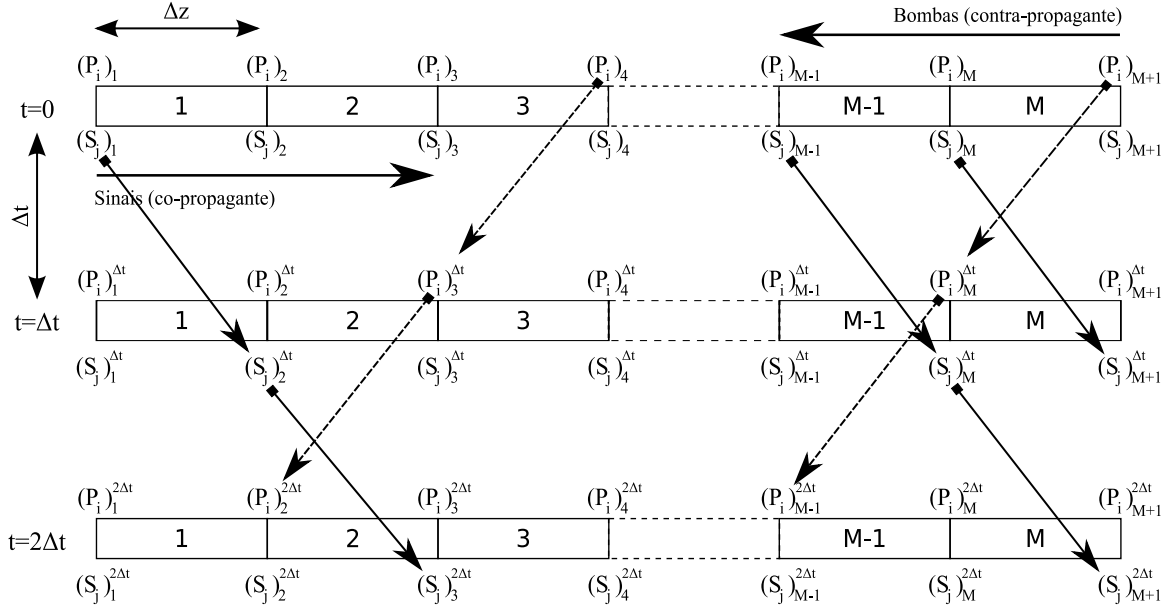


Figura 3.4: Esquema do regime dinâmico de um amplificador à fibra

efectivamente, haver uma convergência de resultados nas iterações Δz tem de ser menor ou igual a 400 metros.

Analisando o esquema apresentado para se perceber de uma forma mais detalhada o algoritmo:

- Seja $(S_1)_1$ a potência do sinal 1 à entrada da fibra para $t = 0$, com o incremento do primeiro instante Δt , $(S_1)_1$ vai-se deslocar para a secção 2, ou seja $(S_1)_2^{\Delta t}$, sofrendo as interações com outros canais da secção 1. No próximo incremento de tempo, o instante $2\Delta t$, a potência $(S_1)_2^{\Delta t}$ desloca-se para a secção 3, para a posição $(S_1)_3^{2\Delta t}$ e assim sucessivamente até sair do amplificador, atingir a posição $m + 1$.
- $(S_1)_1^{\Delta t}$ será a potência do sinal 1 à entrada da fibra no instante Δt , potência essa que o simulador gera automaticamente (de acordo com a evolução do sinal de entrada ao longo do tempo). Sempre que é incrementado um Δt o simulador gera as potências dos sinais e bombas e coloca-as nas respectivas posições iniciais.
- Ao contrário do regime estacionário no cálculo da evolução temporal, para um dado instante, pode haver alterações nas condições fronteira do amplificador. Serão essas alterações como, por exemplo, a variação da potência dos sinais de entrada, que vão permitir simular o efeito transitório no amplificador. Nesta simulação usa-se uma série de Fourier para gerar uma onda quadrada com a frequência desejada, ou então, uma aproximação a um sinal modulado real (sinal modulado por uma onda quadrada que possui deformações de modo a simular o efeito do tempo de relaxação do laser). Assim, depois de gerar a onda quadrada, basta multiplicar pelos sinais que se pretende modelar, para gerar a evolução ao longo do tempo dos sinais, tal como pretendido.

Numericamente para calcular a evolução das potências, tendo em conta o exemplo, tem-se que:

$$\begin{aligned} S_j^+(z_{m+1}, t_{n+1}, \nu_j) &= S_j^+(z_m, t_n, \nu_j) G(z_m, t_n, \nu_j) \\ P_i^-(z_{m+1}, t_{n+1}, \nu_i) &= P_i^-(z_m, t_n, \nu_i) / G(z_m, t_n, \nu_i) \end{aligned} \quad (3.11)$$

Em termos matriciais para calcular a posição $S_j^+(z_{m+1}, t_{n+1}, \nu_j)$ é necessária a informação de $G(z_m, t_n, \nu_j)$, que por sua vez depende da distribuição da potência de todos os sinais e bombas nessa secção, ou seja, como já explicado, para calcular a potência da próxima secção é necessário a informação da anterior. Na situação em que existem bombas a propagarem-se no sentido contra-propagante surge a necessidade de recorrer a um processo iterativo semelhante ao usado no regime estacionário.

3.2 Validação Experimental do Modelo

De modo a perceber se o simulador está a representar correctamente a realidade, é necessário comparar os resultados teóricos com os resultados obtidos experimentalmente e, assim, perceber se, nas condições laboratoriais usadas, o simulador tem um bom comportamento. Será assim possível tirar ilações sobre os estudos a efectuar.

Como a simulação está separada em duas partes, regime estacionário e regime dinâmico, também a comparação com dados experimentais será efectuada para os dois regimes em separado. Assim, primeiro é validado o regime estacionário. Sendo os resultados deste regime usados como condições iniciais para a parte dinâmico, garante-se que a distribuição de potência inicial ao longo da fibra está correcta. No regime dinâmico, estuda-se experimentalmente a evolução da potência dos sinais ao longo do tempo, comparando-se os resultados obtidos pelo simulador com os obtidos experimentalmente.

3.2.1 Regime Estacionário

A experiência usada para avaliação do regime estacionário é mostrado na Figura 3.5:

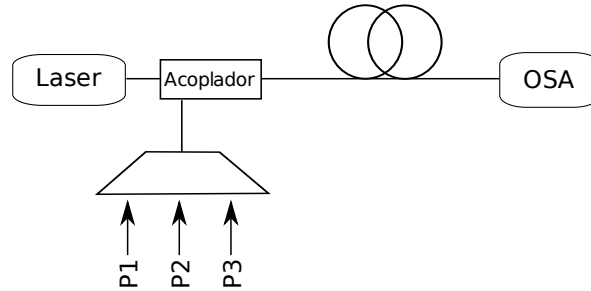


Figura 3.5: Configuração experimental para estudar o regime estacionário

A Figura 3.5 mostra o esquema de um sistema com três bombas co-propagantes. Um multiplexador WDM foi usado para acoplar as 3 bombas; P1 tem um comprimento de onda de 1470 nm com uma potência de 150 mW, P2 tem 1490 nm e uma potência de 180 mW e

3.2. VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DO MODELO

P3 com um comprimento de onda de 1510 nm com 150 mW de potência. O sinal tem 1 mW de potência e comprimento de onda variável. Foram efectuadas medidas entre 1520 nm e 1660 nm. A fibra usada foi uma SMF de 40 km de comprimento, $80 \mu m^2$ de área efectiva e uma atenuação de 0.23 dB/km para o comprimento de onda das bombas e 0.20 dB/km para os sinais.

Em seguida apresentam-se, Figura 3.6 os resultados obtidos pelo simulador implementado:

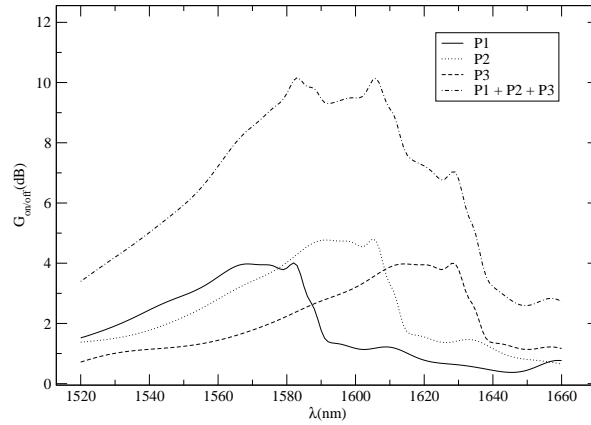


Figura 3.6: Ganho de Raman para diferentes bombas

Comparando os resultados obtidos pelo simulador desenvolvido com os resultados experimentais apresentados em [FP08], verifica-se que são muito semelhantes, tendo-se obtido uma variação máxima entre os resultados simulados e os experimentais de 0.5 dB. Observando estes resultados percebe-se que o simulador está a gerar resultados de acordo com a realidade. O que permite o uso destes resultados como condição inicial para o regime dinâmico.

3.2.2 Regime Dinâmico

Tendo objectivo de detectar experimentalmente o efeito transiente foi realizada no laboratório a seguinte experiência, Figura 3.7.

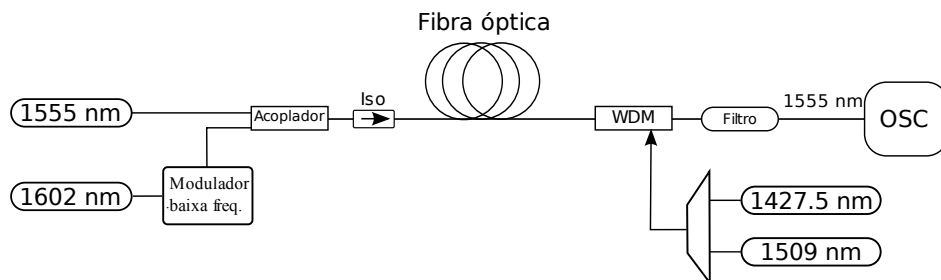


Figura 3.7: Configuração experimental para estudar o regime dinâmico

A experiência consiste em colocar dois sinais à entrada da fibra, um sinal de 1555 nm e outro com 1602 nm, com uma potência de 3 mW e 6 mW de potência à entrada da fibra. O canal 1602 nm foi modulado com uma onda quadrada de frequência de 250 Hz com 50 % de *duty cycle*, de modo a simular a adição/remoção deste canal. O amplificador foi alimentado

com duas bombas contra-propagantes de 1427.5 nm e 1509 nm com uma potência de 98 mW e 144 mW, respectivamente. Foi usada uma fibra SMF de 40 km de comprimento, $80 \mu\text{m}^2$ de área efectiva e uma atenuação de 0.23 dB/km . O filtro óptico foi ajustado de forma a permitir só a transmissão do canal 1555 nm.

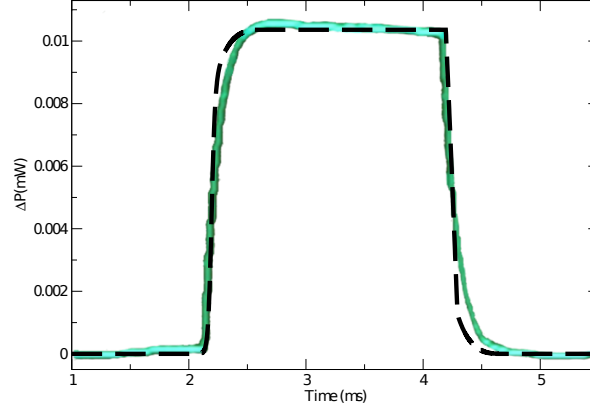


Figura 3.8: Flutuação de potência ao longo do tempo para o canal 1555 nm, resultados experimentais (verde) e simulados (tracejado)

Na Figura 3.8 mostra-se a sobreposição entre os resultados simulados e os obtidos experimentalmente. Como se pode observar o canal contínuo 1555 nm, no final do amplificador, apresenta-se modulado, ou seja, o canal 1602 nm que é modulado à entrada da fibra, está a influenciar o canal contínuo, modelando-o de acordo com a sua adição/remoção. A intensidade destas variações de potência são da ordem dos 0.01 mW. Nesta imagem percebe-se claramente a variação de potência do canal sobrevivente ao longo do tempo, devido ao aparecimento de zonas com diferentes ganhos ao longo da fibra dada à adição e remoção do sinal ao longo desta.

Como se pode observar, a simulação descreve com elevado grau de concordância a evolução temporal do transiente registada no final da fibra. Note-se que a remoção do canal 1602 nm acontece aos dois milissegundos, e a adição aos quatro milissegundos. A simulação e os resultados experimentais apresentam um atraso de τ , devido ao tempo de propagação dos sinais na fibra, tal como esperado.

A intensidade máxima do transiente é da ordem do verificado experimentalmente, conseguindo reproduzir com um elevado grau de qualidade, a evolução do sinal ao longo do tempo à saída do amplificador. As distorções apresentadas devem-se a deformações à entrada da fibra do sinal modulado. De facto, experimentalmente, a onda quadrada não é perfeita, provocando assim distorções da onda à saída da fibra no canal sobrevivente.

3.3 Conclusão

No decorrer deste capítulo foi apresentado o modelo que descreve a propagação de ondas nos amplificadores Raman. Foi descrito o algoritmo desenvolvido e implementado. Comparando os resultados experimentais com os resultados obtidos pelo simulador mostrou-se que o simulador descreve correctamente, nas condições laboratoriais usadas, a realidade. Assim, é uma boa ferramenta para estudar o efeito transiente nos amplificadores Raman.

CAPÍTULO 4

Estudo do Efeito Transiente

NESTE capítulo pretende-se estudar o comportamento do efeito transiente no amplificador Raman em diferentes cenários de operação. Particular atenção deverá ser prestada ao estudo da dinâmica e intensidade deste, de modo a ser possível usar este conhecimento para perceber se alguns destes parâmetros podem ser controlados, de forma a tentar mitigar/compensar o efeito. A ferramenta usada para simular estes cenários será o simulador apresentado anteriormente.

A frequência da adição/remoção dos canais nas simulações será de 250 Hz, e a fibra usada como meio amplificador será uma SMF com 0.23 dB/km e uma área efectiva de $80 \mu m^2$.

4.1 Diferentes Esquemas de Bombeamento

Para esta simulação foram usados diferentes esquemas de bombeamento, numa fibra SMF de 40 km. Usou-se uma bomba com um comprimento de onda de 1450 nm com 800 mW, e três sinais com um 1550 nm, 1551 nm e 1552 nm com 0 dBm/sinal de potência à entrada do amplificador. Provocou-se a remoção dos dois últimos sinais.

Na Figura 4.1a apresenta-se os resultados obtidos. O tempo de propagação do sinal no amplificador é de $\tau = 193 \mu s$. As flutuações de potência, para os três esquemas são de 1.3 dB para o co-propagante, 0.9 dB para o contra-propagante e 1.0 dB para o bi-propagante. A diferença de intensidades dos novos estados estacionários é explicado pelo facto de os amplificadores terem uma curva de ganho característica diferente. Na Figura 4.1b apresenta-se o ganho em função da potência de entrada, para o sinal 1550 nm, quer para o amplificador contra-propagante, quer para o co-propagante. Como se pode verificar, uma variação da potência de entrada, devido à remoção de dois sinais, provoca uma variação do ganho diferente, para cada esquema de bombeamento, que se traduzirá em diferentes intensidades para o transiente do sinal 1550 nm. Quanto maior for a variação do ganho, maior será a intensidade do transiente nos sinais sobreviventes. Como o amplificador Raman co-propagante satura mais rapidamente com o aumento da potência de entrada, irá ter uma intensidade maior, quando comparada com o amplificador contra-propagante. Percebe-se, então, que a intensidade do

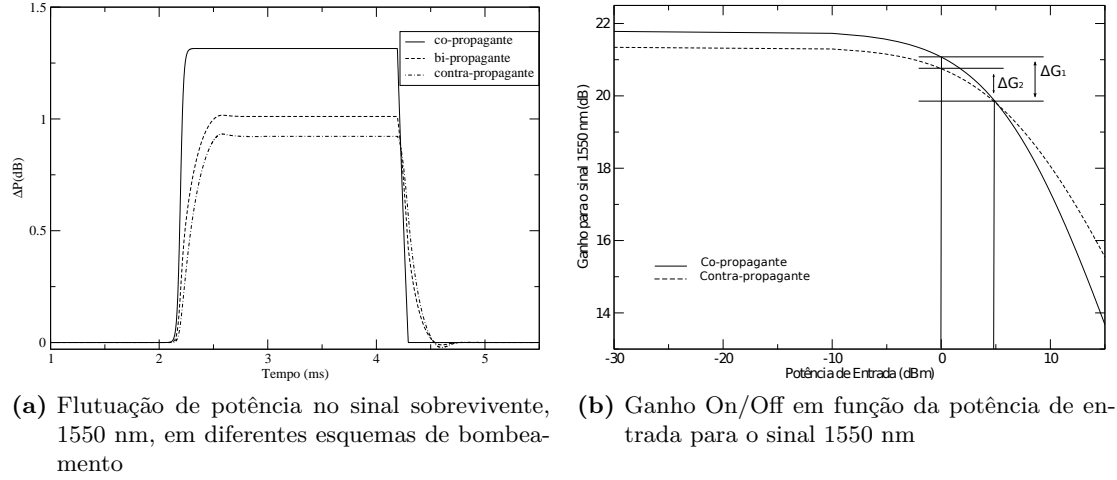


Figura 4.1: Flutuações de potência e ganho on/off de diferentes esquemas de bombeamento

transiente do sinal sobrevivente está relacionada com curva de ganho em função da potência de entrada do amplificador.

Os tempos de subida (de 10 % a 90 % do valor máximo) são de $6.5 \mu s$, $227 \mu s$ e $244 \mu s$ para os esquemas co-propagante, bi-direcional e contra-propagantes, respectivamente. Observando estes resultados verifica-se que, num esquema de bombeamento co-propagante, o transiente tem um tempo de subida muito pequeno. Isto acontece porque a bomba e os sinais têm o mesmo sentido. Aquando da remoção dos sinais, a bomba vai ter mais potência disponível para alimentar o sinal sobrevivente. Então, o sinal sobrevivente experimenta, quase instantaneamente, um ganho maior, usufruindo desse ganho ao longo de todo o comprimento do amplificador, devido ao facto do sinal e a bomba terem velocidades muito semelhantes. No caso do amplificador contra-propagante, o sinal sobrevivente vai experimentar zonas com diferentes ganhos ao longo da fibra, até atingir um novo regime estacionário. O mesmo ocorre para a bomba, que demora alguns instantes de tempo a atingir uma nova distribuição de potência. Devido ao facto de o fenómeno transiente em amplificadores Raman co-propagantes ser quase instantâneo, é muito difícil conseguir aplicar um método de mitigação para controlar o efeito transiente. Assim, não se irá considerar este esquema de bombeamento nos próximos estudos a serem efectuar.

4.2 Diferentes Potências da Bomba

São usados três sinais, 1550 nm, 1551 nm e 1552 nm com 0 dBm por sinal, provocando-se a adição/remoção dos dois últimos sinais com a frequência anteriormente indicada. Simula-se o comportamento do amplificador para uma bomba contra-propagante de 1450 nm com uma potência de 400 mW, 600 mW e 800 mW. A fibra usada possui 40 km de comprimento.

Os resultados obtidos na simulação são apresentados na Figura 4.2. Foram obtidas flutuações de potência da ordem dos 0.12 dB, 0.37 dB e 0.9 dB para as bombas de 400 mW, 600 mW e 800 mW. Os tempos de subida foram de $240 \mu s$, $246 \mu s$, $244 \mu s$, respectivamente.

4.3. DIFERENTES COMPRIMENTOS DE FIBRA

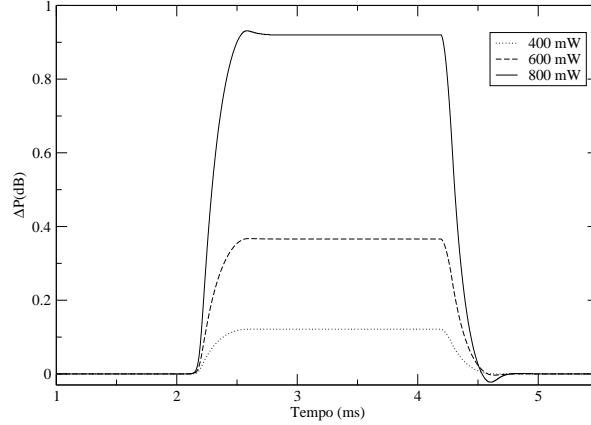


Figura 4.2: Flutuação de potência no sinal sobrevivente, 1550 nm em função do tempo, para $P_p^- = 400, 600, 800$ mW

Como se pode verificar, nesta simulação, quanto maior é a potência da bomba mais intensa é a flutuação de potência do sinal sobrevivente. Tal está directamente relacionado com a curva de ganho característica de cada amplificador, como já foi mencionado anteriormente. Verifica-se que, para as potências 400 mW e 600 mW, o amplificador não tem potência suficiente para amplificar a primeira parte da fibra, fazendo com que o sinal seja atenuado e só depois amplificado. A consequência será a diminuição da intensidade do transiente.

Em relação à dinâmica do transiente, verifica-se que o tempo de subida nestes três casos são da mesma ordem de grandeza, ou seja, a dinâmica do transiente não é directamente influenciada pela potência da bomba.

Assim, numa primeira abordagem, de forma a mitigar o efeito transiente deverá manter-se o amplificador Raman alimentado com o mínimo de potência possível, de modo a que a intensidade do transiente seja o mais pequena possível.

4.3 Diferentes Comprimentos de Fibra

Neste caso, o factor a variar será o comprimento da fibra. Serão usadas fibras com um comprimento de 20 km, 40 km, 60 km e 80 km. São alimentados por uma bomba contra-propagante de $\lambda_p = 1450$ nm; $P_p^- = 800$ mW; $\lambda_s = 1550$ nm, 1551 nm e 1552 nm com uma potência de entrada de 0 dBm por sinal.

Na Figura 4.3, apresentam-se variações de potência da ordem dos 0.49 dB, 0.93 dB, 0.76 dB e 0.45 dB para comprimentos de fibra de 20 km, 40 km, 60 km e 80 km, respectivamente. Como facilmente se verifica, o máximo de variação de potência acontece para o comprimento de 40 km. Tal está directamente relacionado com o comprimento efectivo de amplificação, ou seja, na fibra de 20 km, não chega a haver comprimento suficiente para utilizar a energia disponível da bomba para amplificar o sinal. Já no caso de 80 km, inicialmente, o sinal é atenuado e só depois amplificado. Essa atenuação inicial do sinal de entrada vai provocar uma flutuação de potência mais pequena.

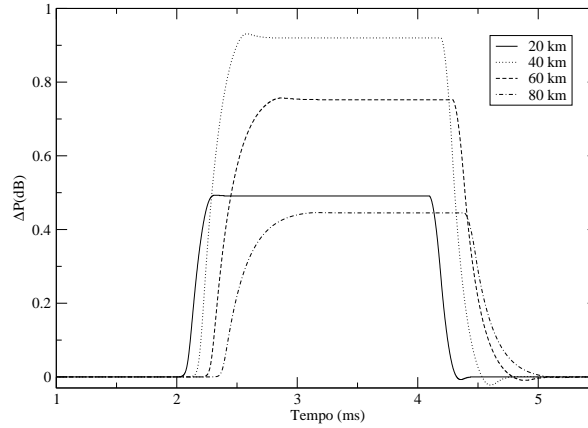


Figura 4.3: Flutuação de potência no sinal sobrevivente, 1550 nm, em função do tempo, para diferentes comprimentos de fibras

Relativamente aos tempos de subida, obteve-se 145 μs , 244 μs , 317 μs e 368 μs para os comprimentos de 20 km, 40 km, 60 km e 80 km, respectivamente. Como se pode verificar o tempo de subida está directamente relacionado com o comprimento da fibra. Uma fibra com um comprimento mais pequeno vai ter um tempo de subida menor. Isto deve-se ao facto do tempo que demora a bomba a conseguir atingir o novo estado estacionário, quanto mais longa é a fibra mais tempo a bomba contra-propagante vai demorar a conseguir restabelecer o equilíbrio, fazendo com que o tempo de subida seja mais longo. Percebe-se, assim, que o tempo de subida nos amplificadores Raman contra-propagantes está relacionado com o comprimento da fibra. Contudo a relação entre comprimento e aumento de tempo de subida não é linear. No caso dos amplificadores co-propagantes o mesmo já não se verifica, visto que os sinais e a bomba têm o mesmo sentido de propagação.

4.4 Diferentes Potências dos Canais de Entrada e Número de Canais Removidos

O objectivo é estudar o comportamento do efeito transiente, aquando da remoção de um e dois canais e perceber a influência de diferentes potências de entrada dos sinais. Nesta simulação é usada uma SMF de 40 km; $\lambda_p = 1450 nm$; $P_p^- = 800 mW$; $\lambda_s = 1550 nm$, 1551 nm e 1552 nm com uma potência de entrada de -5.0 dBm/sinal, 0 dBm/sinal e 3 dBm/sinal.

Os resultados obtidos pelo simulador são apresentados na Figura 4.4. Observando os casos em que se varia a potência dos sinais de entrada, mas mantém-se o número de canais que se remove (os dois últimos canais), obteve-se 0.39 dB, 0.93 dB e 1.4 dB, para potências de entrada de -5 dBm, 0 dBm e 3 dBm por sinal. Esta simulação clarifica o comportamento do transiente, aquando da modificação da potência de entrada. Sabe-se que o ganho para cada sinal, devido à curva de ganho do amplificador vai depender da potência de entrada total no amplificador. Como a potência por sinal é maior, aquando da remoção de dois sinais, irá provocar-se uma maior variação de potência à entrada do amplificador. Assim irá provocar

4.5. COMPORTAMENTO DE UMA CASCATA DE AMPLIFICADORES DE RAMAN

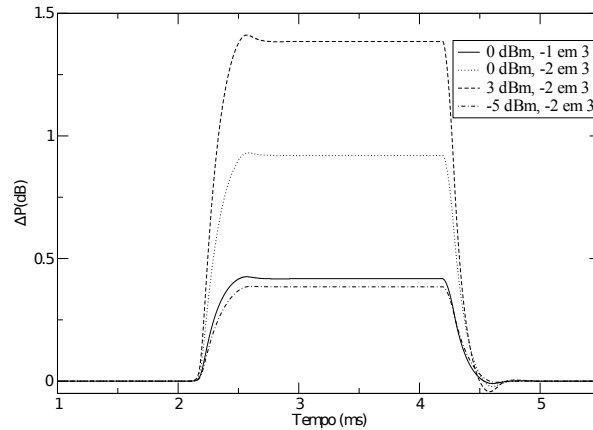


Figura 4.4: Flutuação de potência no sinal sobrevivente em função do tempo, para diferentes potências de entrada e número de canais removidos

um maior impacto na curva de ganho do amplificador, provocando, assim, um transiente mais intenso.

Ainda para esta situação relativamente aos tempos de subida obtiveram-se $253 \mu s$, $244 \mu s$ e $233 \mu s$, para potências de entrada de -5 dBm , 0 dBm e 3 dBm , respectivamente. Verifica-se, então, que à medida que se aumenta a potência de entrada, mais pequeno se torna o tempo de subida. Estas duas características podem ter um impacto muito grande numa cascata de amplificadores, em que as flutuações de potência ao passar numa série de amplificadores vão tornar-se cada vez mais intensas e cada vez mais rápidas, tornando-se mais difíceis de controlar/mitigar.

Em relação à variação do número de canais que se remove foi obtida uma variação de potência e um tempo de subida de 0.43 dB , 0.93 dB e $232 \mu s$ e $244 \mu s$ para a remoção de um ou dois canais com uma potência de entrada de 0 dBm , respectivamente. Como se pode verificar pelos resultados obtidos, quantos mais canais forem removidos, maior será a intensidade do transiente, uma vez que maior será a variação de potência à entrada do amplificador. Verifica-se também que a remoção de um sinal provoca um transiente mais rápido, quando comparado com a remoção de dois canais.

4.5 Comportamento de uma Cascata de Amplificadores de Raman

Pretende-se perceber o comportamento do efeito ao longo de uma cascata de amplificadores, de forma a compreender qual o real impacto do sinal atravessar uma série de amplificadores num sistema de comunicação WDM real.

O simulador foi desenvolvido com base no simulador para um amplificador de Raman. Permite simular diferentes configurações e alterar os mais variados parâmetros. A simulação aqui apresentada pretende elucidar o comportamento no regime dinâmico dos amplificadores, de forma a perceber a evolução do transiente ao longo de uma cascata de amplificadores.

4.5.1 Simulação de 3 Amplificadores em Cascata com 600 mW, 400 mW e 200 mW

Foi simulada uma cascata de três amplificadores Raman com três bombas contra-propagantes (uma bomba por cada amplificador de Raman), e com um comprimento de onda de 1450 nm com 600 mW, 400 mW e 200 mW. Foram usadas fibras SMF com 40 km com uma atenuação de 0.23 dB/km e uma área efectiva de $80 \mu m^2$, perfazendo um comprimento total de 120 km. Simularam-se três canais com 1550 nm, 1551 nm, 1552 nm com 1 mW/sinal de potência à entrada do primeiro amplificador e provocou-se a adição/remoção dos dois últimos canais com uma frequência de 250 Hz.

Na Figura 4.5 pode-se observar o comportamento do sinal 1550 nm ao longo dos três amplificadores, no regime estacionário, antes de ocorrer a remoção dos restantes canais. Como se pode constatar, em cada amplificador o sinal é atenuado no início da fibra e só depois é amplificado pela bomba contra-propagante.

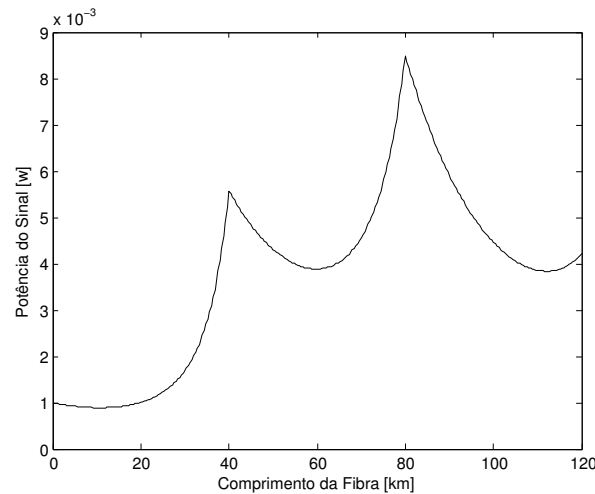


Figura 4.5: Evolução da potência do sinal 1550 nm ao longo dos três amplificadores, antes de ocorrer a adição/remoção dos sinais

Na Figura 4.6, apresenta-se o comportamento das bombas ao longo dos três amplificadores. Em cada amplificador é usada uma bomba contra-propagante, com uma intensidade de 600 mW para o primeiro amplificador, 400 mW no caso do segundo e 200 mW para o terceiro amplificador. Pode-se também observar a perda de potência das bombas devido à atenuação provocada pela fibra e pela perda de energia para a alimentação dos sinais ao longo de cada amplificador.

4.5. COMPORTAMENTO DE UMA CASCATA DE AMPLIFICADORES DE RAMAN

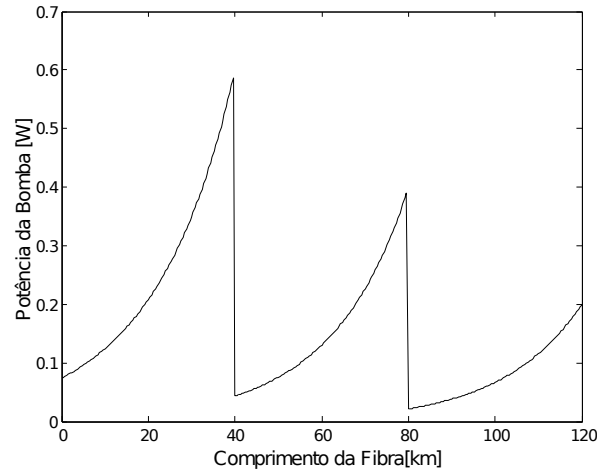


Figura 4.6: Evolução da potências das bombas contra-propagantes ao longo dos 3 amplificadores, antes da adição/remoção dos sinais

Na Figura 4.7 representa-se graficamente a flutuação de potência à saída de cada amplificador. Pode observar-se que à medida que o sinal sobrevivente passa pelos amplificadores a intensidade do transiente vai aumentando. Assim, à saída do primeiro amplificador, alimentado com uma bomba de 600 mW, obteve-se um transiente da ordem dos 0.36 dB e um tempo de subida de 256 μs ; à saída do segundo amplificador contra-propagante com uma bomba de 400 mW, obteve-se 0.84 dB e um tempo de subida de 236 μs ; à saída do terceiro amplificador alimentado com uma potência de 200 mW obteve-se um transiente de 1.07 dB e um tempo de subida de 231 μs .

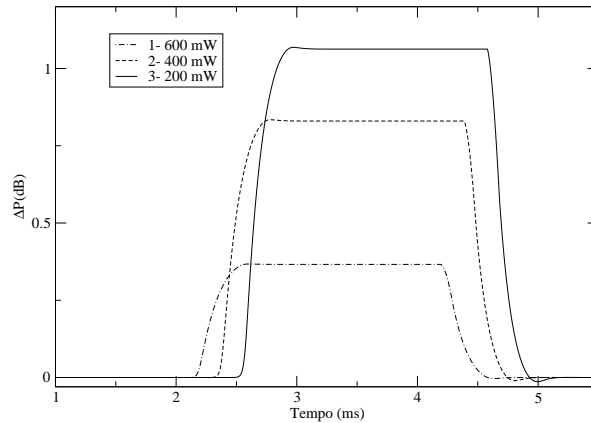


Figura 4.7: Flutuação de potência do sinal sobrevivente ao longo de três amplificadores

Verifica-se que mesmo diminuindo a potência das bombas no segundo e terceiro amplificador, o efeito transiente vai tornar-se mais intenso e mais rápido à medida que se propaga ao longo dos amplificadores. Isto pode ser muito preocupante para as redes de comunicação ópticas, porque à medida que o efeito se torna mais rápido e intenso, mais difícil será mitigar o efeito e evitar que este prejudique os sistemas de comunicação óptica.

4.6 Conclusão

Com estas simulações pode concluir-se que a intensidade do transiente está directamente relacionada com a curva de ganho do amplificador Raman e com o impacto, nessa mesma curva, da variação de potência de entrada devido à adição/remoção de canais.

Em relação à dinâmica do transiente, verifica-se que o esquema de bombeamento tem um impacto muito significativo no tempo de subida do transiente, como explicado anteriormente. O comprimento da fibra também influencia de forma significativa a dinâmica do transiente, ou seja, com o aumento da distância, aumenta o tempo de subida. Mostrou-se também que uma cascata de amplificadores vai aumentar a intensidade e diminuir o tempo de subida do efeito transiente.

Percebe-se, então, que na construção de um amplificador Raman compatível com redes ópticas com encaminhamento a nível da camada óptica, é imperioso tentar controlar alguns destes parâmetros, de modo a diminuir a intensidade e aumentar o tempo de subida, do efeito transiente, de forma a ser mais fácil aplicar uma técnica de mitigação. Uma maneira de o conseguir será, por exemplo, usar um esquema de bombeamento contra-propagante, e fazer diminuir as potências das bombas. Tal pode ser conseguido através do aumento da eficiência dos amplificadores Raman.

CAPÍTULO 5

Proposta para um Amplificador de Raman

PERCEBENDO que o comprimento da fibra usada na construção do amplificador de Raman não é equacionado para aproveitar toda a potência debitada pelas bombas, pode pensar-se em formas alternativas de usar essa potência. Aumenta-se, assim, a eficiência dos amplificadores Raman. Várias propostas foram apresentadas para reaproveitar essa energia. Um exemplo é o de usar a energia excedente para alimentar um amplificador EDFA [LCH⁺05]. Em [KSC⁺07] o autor propõe uma configuração usando redes de Bragg ou espelhos no comprimento de onda das bombas. O objectivo é reflectir a potência das bombas à saída do amplificador, injectando-as, de novo, na fibra, comportando-se como uma segunda bomba. No artigo é apresentado um estudo desta configuração para o regime estacionário, onde se mostra que a reflexão da potência que não é aproveitada num amplificador de Raman contra-propagante permite aumentar o ganho deste. Optando-se por manter o mesmo ganho, à saída do amplificador, que um amplificador tradicional, permite diminuir a potência das bombas, melhorando parâmetros importantes como a relação sinal-ruído óptico [*Optical Signal-to-Noise Ratio*] (OSNR).

Como já foi apresentado, com o desenvolvimento das redes ópticas dinâmicas vão ocorrer rápidas adições/remoções de sinais. Surge, então, a necessidade de perceber e prever o comportamento desta configuração aquando da adição/remoção de sinais, tentando-se perceber se esta traz, efectivamente, vantagens a nível da resposta à adição/remoção de sinais.

Com a inclusão da rede de Bragg no amplificador converte-se um amplificador contra-propagante ou co-propagante num amplificador bidireccional com uma única bomba. Já foram efectuados estudos com um amplificador bi-direccional ao nível da adição/remoção de sinais, [KSC⁺07], usando duas bombas independentes, uma co-propagante e outra contra-propagante. Os autores mostraram que o uso de uma de bomba co-propagante de baixa potência traz vantagens, visto que é necessária uma bomba contra-propagante de potência menor para atingir o mesmo ganho. Mas, nesta configuração proposta, devido ao facto de no regime dinâmico, aquando da adição/remoção de sinais, ocorrerem flutuações na potência da bomba ao longo da fibra, é necessário avaliar se essas terão um impacto significativo no comportamento dinâmico deste amplificador.

5.1 Amplificador de Raman com Reflexão da Potência da Bomba

Na Figura 5.1a e 5.1b são apresentados esquemas de um amplificador contra-propagante e co-propagante, com a implementação, nas respectivas posições, de redes de Bragg. Note-se o uso da rede de Bragg à entrada do amplificador contra-propagante e na saída do amplificador no caso do amplificador co-propagante. Ambas as redes de Bragg têm o pico de reflexão no comprimento de onda da bomba, de modo a que a potência que não é absorvida e atenuada ao longo do amplificador seja reflectida, aumentando-se a potência de bomba disponível na fibra. Pretende-se, então, estudar o comportamento destas configurações aquando da adição/remoção dos sinais, comparando-o com outros esquemas de bombeamento. Por esse motivo irá manter-se o ganho constante para o sinal 1550 nm quando todos os sinais estão ligados em todos os esquemas de bombeamento, sendo assim possível comparar o comportamento dos amplificadores.

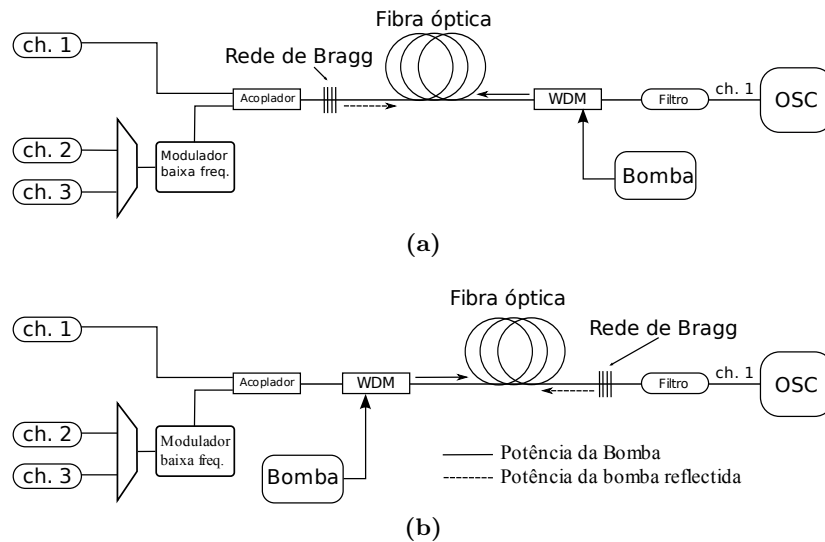


Figura 5.1: Esquema de um amplificador a) Contra-propagante e b) co-propagante de um RFA com uso da rede de Bragg

Pretende-se perceber se este esquema traz vantagens quando comparado com esquemas de bombeamento tradicionais, nomeadamente o contra-propagante, co-propagante e bi-propagante com o uso de duas bombas independentes. Para tal, serão realizadas várias simulações em diferentes esquemas de bombeamento, diferentes potências das bombas contra-propagantes e diversos comprimentos de fibra, para perceber se de facto esta configuração acrescenta alguma vantagem ao universo das comunicações ópticas.

5.1.1 Condições Fronteira

Para simular o comportamento deste amplificador foi utilizado o simulador apresentado anteriormente, tendo sido devidamente adaptado para esta configuração.

5.1. AMPLIFICADOR DE RAMAN COM REFLEXÃO DA POTÊNCIA DA BOMBA

As condições fronteiras foram reescritas de acordo com o problema. No caso da reflexão de potência da bomba, introduz-se uma rede de Bragg no lado oposto desta com um pico de reflexão de aproximadamente 100 % no comprimento de onda da bomba. Assim, as condições fronteira serão:

Para o amplificador contra-propagante,

$$\begin{aligned} P_{pump}^-(L, t, \nu) &= P_{pump}(\nu) \\ P_{pump}^+(0, t, \nu) &= P_{pump}^-(0, t, \nu). \end{aligned} \quad (5.1)$$

Para o co-propagante,

$$\begin{aligned} P_{pump}^+(0, t, \nu) &= P_{pump}(\nu) \\ P_{pump}^-(L, t, \nu) &= P_{pump}^+(L, t, \nu). \end{aligned} \quad (5.2)$$

Definem-se as condições fronteira, de modo que a potência da bomba à saída ou à entrada do amplificador seja novamente injectada no amplificador.

5.1.2 Cenários de Simulação

Para investigar o comportamento do sinal sobrevivente, aquando da remoção de sinais à entrada dos amplificadores (Figuras 5.1a e 5.1b), simulou-se um amplificador de Raman com 40 km de fibra SMF, e uma área efectiva de $80 \mu m^2$ e uma atenuação de 0.22 dB/km. Usaram-se bombas com comprimento de onda de 1450 nm com potência variável e três sinais, 1550 nm 1551 nm e 1552 nm, com 0 dBm por sinal, provocando-se a remoção dos dois últimos no regime dinâmico com uma frequência de 250 Hz.

Regime Estacionário

Na Figura 5.2 é apresentado a curva de ganho em função da potência de entrada, para os amplificadores contra-propagantes com e sem a rede de Bragg (com a mesma potência da bomba, 700 mW), e para o amplificador com uma rede de Bragg, mas com a potência de bomba reduzida, de modo a que o ganho seja igual ao do amplificador contra-propagante sem a rede de Bragg. Com o uso da rede de Bragg, obtém-se um incremento no ganho da ordem dos 2 dB, quando comparado com o amplificador sem a rede.

Pode observar-se um comportamento diferente entre o amplificador contra-propagante sem a rede de Bragg e o amplificador com a rede de Bragg com uma menor potência de bomba. Isto acontece porque o amplificador com a rede de Bragg comporta-se, no regime estacionário, como um amplificador bidireccional, tendo este tipo de amplificador uma curva de ganho em função da potência de entrada ligeiramente diferente que a do amplificador contra-propagante.

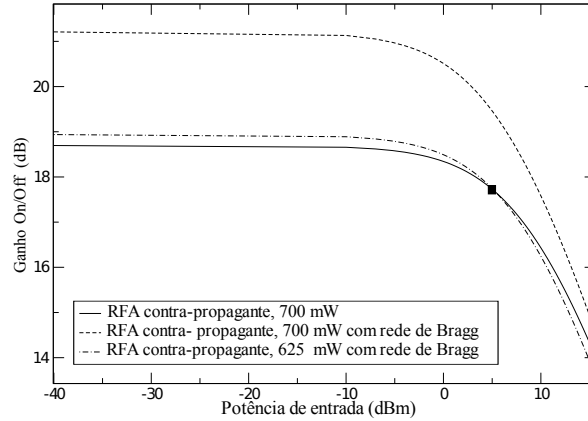


Figura 5.2: Ganho de um RFA para o sinal 1550 nm em função da potência de entrada, para o amplificador com e sem a rede de Bragg; $L_{SMF} = 40$ km; $\lambda_p = 1450$ nm; $\lambda_s = 1550$ nm

Comparação Entre Diferentes Esquemas de Bombeamento

Para estudar e perceber qual o impacto de usar uma rede de Bragg para reflectir a potência da bomba, comparou-se o efeito transiente no sinal sobrevivente, aquando da adição/remoção de 2 sinais, em diferentes esquemas de bombeamento:

- I – RFA contra-propagante com uma potência da bomba de 700 mW;
- II – RFA contra-propagante com a rede de Bragg, com uma potência da bomba de 625 mW;
- III – RFA bidireccional com duas bombas independentes, uma contra-propagante com 625 mW e a co-propagante com 75 mW;
- IV – RFA co-propagante com uma potência da bomba 700 mW;
- V – RFA co-propagante com a rede de Bragg, com uma potência da bomba de 635 mW;
- VI – RFA bidireccional com duas bombas independentes, uma co-propagante com 635 mW e uma contra-propagante com 62.5 mW.

Nos amplificadores II e V reduziu-se a potência da bomba para obter o mesmo ganho para os sinais, que os amplificadores I e IV, respectivamente, para o sinal 1550 nm. Nos amplificadores III e VI usaram-se duas bombas independentes com o mesmo comprimento de onda, onde a segunda bomba possui uma potência igual à reflectida pela rede de Bragg no regime estacionário.

A Figura 5.3a e Figura 5.3b mostram a evolução temporal do sinal sobrevivente, 1550 nm, aquando da adição/remoção dos dois últimos sinais em função do tempo, para diferentes esquemas de bombeamento. A remoção dos sinais ocorre aos 2 ms e a adição aos 4 ms. O tempo de propagação na fibra é de 193 μ s.

Como se pode observar pelos resultados obtidos, no amplificador IV o tempo de subida é muito mais pequeno, com um tempo de subida de 6.4 μ s e uma intensidade de 0.87 dB, que o do amplificador contra-propagante I, com um tempo de subida de 247 μ s e uma intensidade

5.1. AMPLIFICADOR DE RAMAN COM REFLEXÃO DA POTÊNCIA DA BOMBA

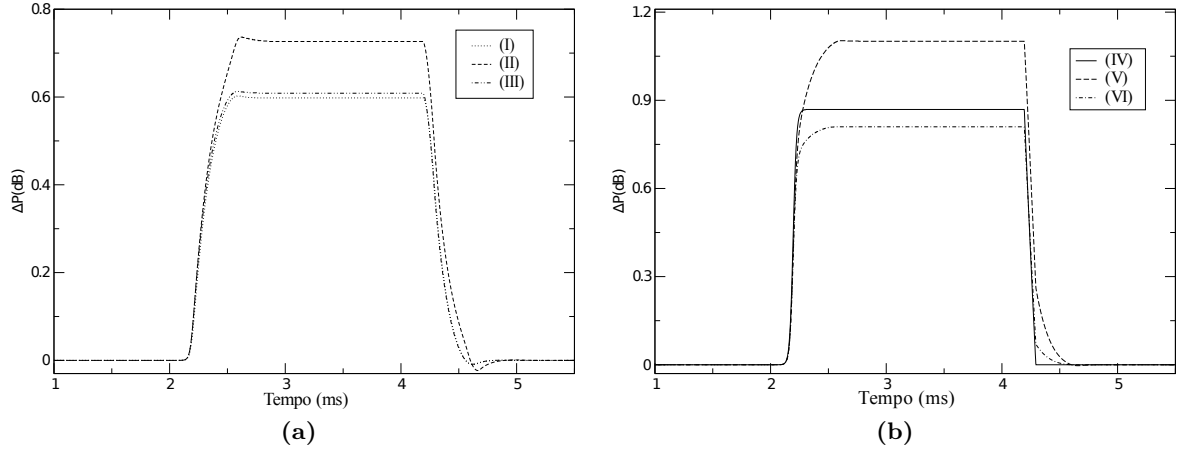


Figura 5.3: Variação de potência em função de tempo para o sinal sobrevivente, 1550 nm, para diferentes esquemas de bombeamento contra-propagantes, quando 2 de 3 sinais são adicionados/removidos; $L_{SMF} = 40$ km; $\lambda_p = 1450$ nm; $P_{p,in} = 700$ mW; $\lambda_s = 1550, 1551, 1552$ nm; $P_{s,in} = 0$ dBm/channel

de 0.6 dB. Este resultado é coerente com os apresentados no capítulo 3, em que o esquema de bombeamento co-propagante apresenta um tempo de subida menor e uma intensidade maior, quando comparado com o amplificador contra-propagante.

Usando o esquema de bombeamento bidireccional com duas bombas independentes, amplificador VI (635 mW co-propagante e 63.5 mW contra-propagante), verifica-se que diminuiu a flutuação de potência, obtendo-se um tempo de subida de $93 \mu s$ e uma variação de potência de 0.81 dB, quando comparado com o amplificador IV. No caso do amplificador III, verifica-se que o comportamento do transiente é da mesma ordem de grandeza quando comparado com o amplificador I. Obteve-se uma intensidade de 0.61 dB e um tempo de subida de $246 \mu s$.

Quando a rede de Bragg é implementada, amplificadores II e V, os resultados mostram que as flutuações de potência são mais intensas em ambas as situações. No amplificador V, a intensidade chega a atingir 1.10 dB com um tempo de subida de $199 \mu s$. Como se pode verificar, apesar da potência da bomba ser mais baixa, as flutuações de potência no sinal sobrevivente são maiores que o amplificador IV. No caso do amplificador II, apresenta um tempo de subida da ordem dos $316 \mu s$ e uma intensidade de 0.73 dB. Assim, apesar do tempo de subida ser maior, o que pode ser uma vantagem para mais facilmente controlar o efeito transiente com o recurso a uma técnica de mitigação, a intensidade é muito maior. Mostra-se, então, que esta configuração tem uma pior resposta à adição/remoção de sinais quando comparada com os outros esquemas de bombeamento.

Comparando os amplificadores com alimentação bidireccional com duas bombas independentes, amplificadores III e VI, com os amplificadores com a rede de Bragg, amplificadores II e V respectivamente, apesar de ambos os amplificadores terem o mesmo comportamento no regime estacionário (potências de entrada de sinais e bomba e comportamento dos sinais e bomba), no regime dinâmico os amplificadores com a rede de Bragg têm um efeito transiente mais intenso, aquando a adição/remoção de sinais à entrada do amplificador. Isto acontece devido ao facto de a potência da bomba sofrer perturbações ao longo do amplificador de-

vido à adição/remoção dos sinais. Essas perturbações vão ser reflectidas pela rede de Bragg e re-injectadas no amplificador. Estes resultados mostram que essas flutuações vão ter um impacto muito negativo no comportamento dinâmico do amplificador, chegando a aumentar a intensidade do transiente em 27 % no amplificador co-propagante V.

Pretende-se perceber o comportamento da potência da bomba reflectida na rede de Bragg. Na Figura 5.4 mostra-se o comportamento da potência das bombas que serão re-injectadas na fibra. Assim, a primeira simulação descreve a variação de potência reflectida à saída da fibra no sentido contra-propagante, amplificador V (quando se usa uma bomba de 635 mW no sentido co-propagante). No segundo caso apresenta-se a variação de potência da bomba à entrada da fibra, amplificador II (bomba contra-propagante de 625 mW). Como se pode observar, o comportamento da potência da bomba re-injectada depende da posição da rede de Bragg, estando relacionado com os sentidos de propagação entre os sinais e a bomba. Quando a rede de Bragg é colocada no início do amplificador II, ao remover sinais, de acordo com esquema apresentado na Figura 3.4, no próximo incremento de tempo a bomba já é afectada por esta variação da potência de entrada, isto porque a bomba e os sinais têm sentidos diferentes. No caso da rede de Bragg estar no final do amplificador, amplificador V, quando existe a remoção dos sinais a bomba vai sofrer uma variação, a qual irá demorar o tempo de propagação a chegar ao final da fibra, já que os sinais e a bomba têm o mesmo sentido.

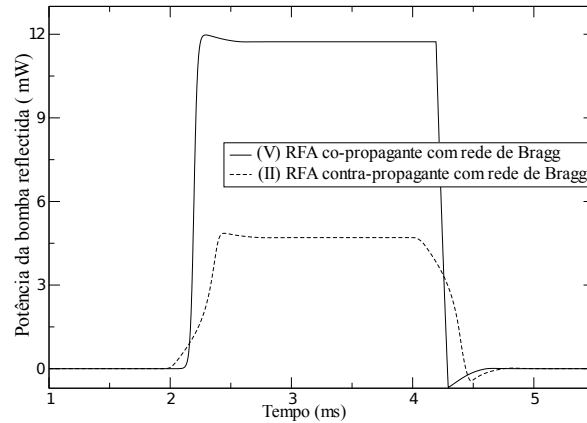


Figura 5.4: Evolução temporal da potência da bomba reflectida pela rede de Bragg no caso do amplificador contra-propagante (Figura 5.1(a)) e co-propagante (Figura 5.1(b)), quando 2 de 3 sinais são adicionados/removidos; $L_{SMF} = 40$ km; $\lambda_p = 1450$ nm; $P_{p,in} = 700$ mW; $\lambda_s = 1550, 1551, 1552$ nm; $P_{s,in} = 0$ dBm/channel

As diferentes intensidades devem-se às diferentes curvas do ganho em função da potência de entrada de um amplificador co-propagante e contra-propagante, Figura 5.5. Como o amplificador co-propagante com a rede de Bragg satura mais rapidamente com o aumento da potência de entrada, as flutuações de potência da bomba, quando ocorre a adição/remoção de sinais, vão ser mais intensas. Na Figura 5.6 mostra-se a potência reflectida pelas redes de Bragg em função da potência de entrada. A variação da potência de entrada irá produzir uma flutuação de potência da bomba, à saída da fibra, mais intensa, quando comparado com o amplificador de Raman contra-propagante com uma rede de Bragg. Comparando a curva da potência da bomba reflectida em função da potência de entrada, com as flutuações de potência da bomba, Figura 5.4, devido à adição/remoção de sinais, percebe-se que a intensidade

5.1. AMPLIFICADOR DE RAMAN COM REFLEXÃO DA POTÊNCIA DA BOMBA

da flutuação de potência é igual à variação da potência da bomba reflectida em função da potência de entrada.

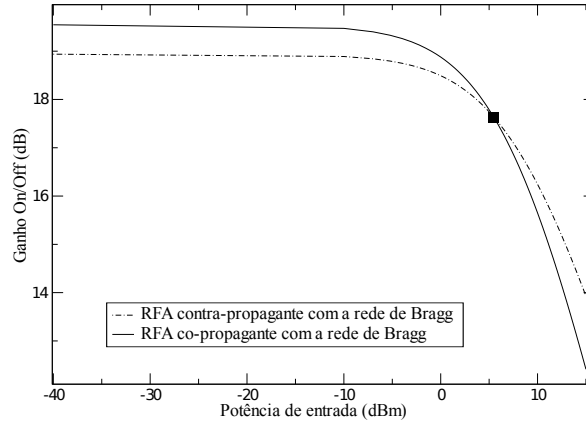


Figura 5.5: Curva de ganho para os amplificadores contra-propagantes com 625 mW e uma rede de Bragg Figura 5.1(a) e o amplificador co-propagante 635 mW com uma rede de Bragg Figura 5.1(b), em função da potência de entrada; $L_{SMF} = 40$ km; $\lambda_p = 1450$ nm; $\lambda_s = 1550$ nm; $P_{s,in} = 0$ dBm

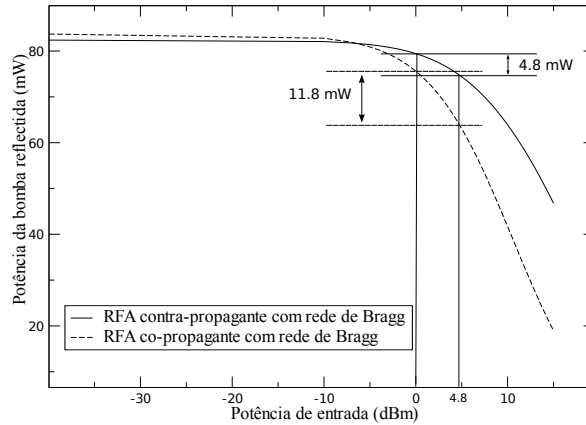


Figura 5.6: Potência da bomba reflectida pela rede de Bragg para um amplificador contra-propagante com 625 mW com a rede de Bragg Figura 5.1(a) e para o amplificador co-propagante com 635 mW com a rede de Bragg Figura 5.1(b), em função da potência de entrada; $L_{SMF} = 40$ km; $\lambda_p = 1450$ nm; $\lambda_s = 1550$ nm

Diferentes Potências de Bomba

Como já foi referido, os transientes em amplificadores co-propagantes são muito rápidos. Por esse motivo irá apenas estudar-se o amplificador contra-propagante com a rede de Bragg.

Com o objectivo de perceber o impacto da intensidade da bomba no comportamento do transiente, quando se re-injecta a potência da bomba excedente na fibra, foram feitas simulações para várias potências da bomba contra-propagante, nomeadamente 300 mW, 600 mW e 800 mW. O ganho será mantido constante em todos os amplificadores para cada potência, para isso diminuir-se-à a potência da bomba no amplificador de Raman com a rede de Bragg.

Apresenta-se, na Figura 5.7, a flutuação de potência para o sinal 1550 nm para as potências de 300 mW, 600 mW e 800 mW, no caso do uso de uma bomba de contra-propagante com e sem re-injecção de potência com o uso da rede de Bragg e também para o caso de se usar duas bombas independentes.

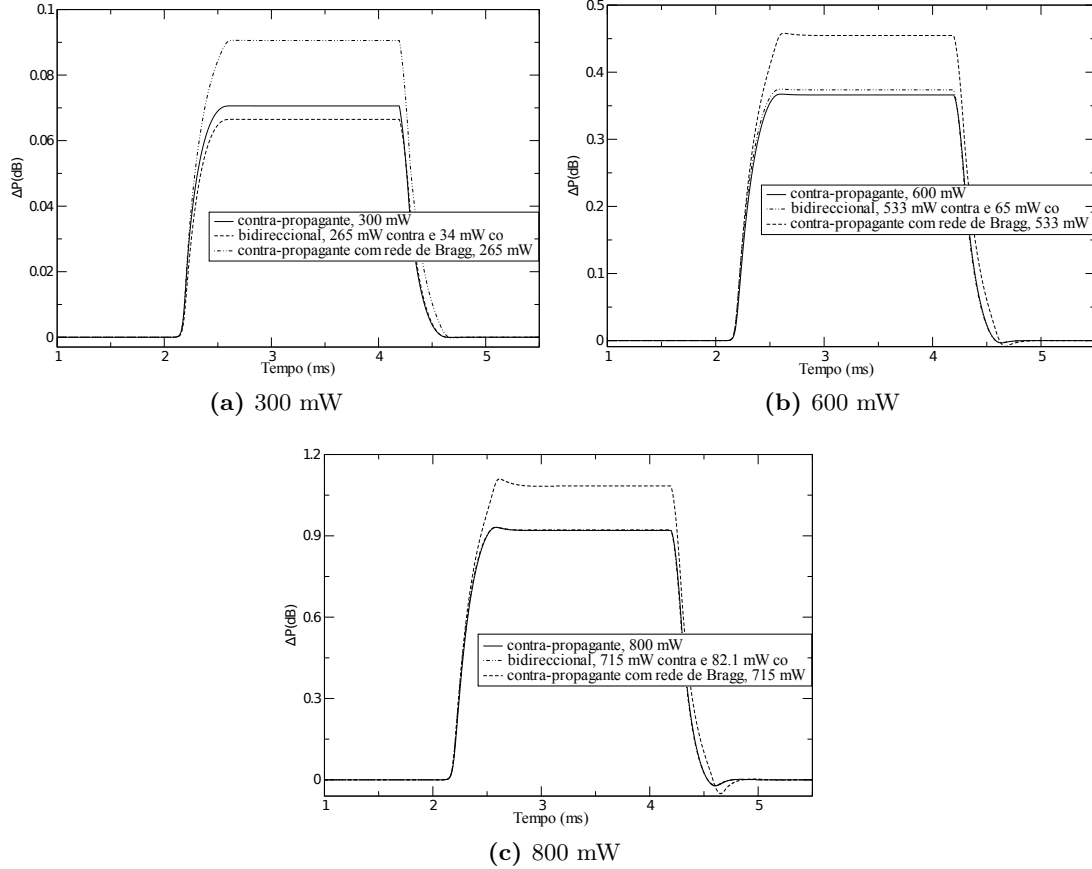


Figura 5.7: Variação da potência do sinal 1550 nm em função do tempo, para diferentes potências de bombeamento, quando 2 de 3 sinais são adicionados/removidos, para diferentes potências de bomba; $\lambda_p = 1450$ nm; $\lambda_s = 1550$ nm, 1551 nm, 1552 nm; $P_{s,in} = 0$ dBm por sinal

Como se pode observar, na Figura 5.7, para estes três casos, as flutuações de potência são mais significativas quando se usa a rede de Bragg para reflectir a potência da bomba. Contudo, o impacto das flutuações de potência da bomba re-injectada pela rede de Bragg vai ser atenuado à medida que se aumenta a potência da bomba. Os resultados mostram que existe um aumento de mais de 28 %, 24 % e 19 % para as potências de 300 mW, 600 mW e 800 mW, respectivamente. Mais uma vez, a diferença de comportamento entre os amplificadores com as redes de Bragg e os bidireccionais, com duas bombas independentes, deve-se às flutuações de potência da bomba. A diminuição acontece porque, à medida que a potência da bomba aumenta, a percentagem de flutuação deixa de ser significativa, aproximando-se de um amplificador convencional.

5.1.3 Diferentes Comprimentos da Fibra

O comprimento da fibra vai ter um grande impacto no aumento do ganho pelo uso da rede de Bragg, como se pode verificar na Figura 5.8. À medida que se aumenta o comprimento da fibra, para a mesma potência da bomba, o aumento de ganho do amplificador com uma bomba de 600 mW e uma rede de Bragg, vai diminuir em relação ao amplificador contra-propagante com uma bomba de 600 mW.

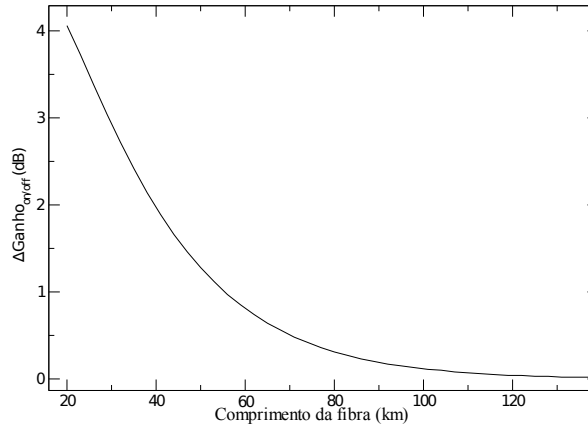


Figura 5.8: Δ Ganho *on/off* entre um amplificador contra-propagante com uma rede de Bragg e o respectivo amplificador sem rede de Bragg, em função do comprimento da fibra; $\lambda_p = 1450$ nm; $P_{p,in} = 600$ mW; $\lambda_s = 1550$ nm; $P_{s,in} = 0$ dBm

Tal acontece porque à medida que o comprimento da fibra aumenta, a potência da bomba que atinge a outra extremidade da fibra vai diminuindo, não só pela atenuação, mas também pela amplificação dos sinais e geração de ruído. Reflectindo-se menos energia, diminui-se o aumento do ganho quando comparado com um amplificador normal.

Para estudar a dependência das flutuações de potência com a distância simulou-se um amplificador contra-propagante, com e sem a rede de Bragg. O comprimento de onda da bomba foi de 1450 nm e potência de 600 mW para o amplificador sem a rede de Bragg e foi reduzida para o amplificador com a rede de Bragg, de modo a conseguir sempre o mesmo ganho para os sinais. Simularam-se 3 sinais, 1550 nm 1551 nm e 1552 nm e provocou-se a adição/remoção dos últimos 2 sinais. Os resultados obtidos mostram que para distâncias de 20 km, 40 km, 60 km e 80 km o aumento da intensidade da potência relativamente ao amplificador sem a rede de Bragg foi superior em 40 %, 20 %, 15 %, 10 % e 5 %, respectivamente. Como se pode depreender, o impacto das flutuações de potência reflectidas pela rede de Bragg para a fibra vai diminuir.

A intensidade do transiente em amplificadores com redes de Bragg afasta-se do impacto que a adição/remoção dos sinais tem na curva de ganho em função da potência de entrada. Isto acontece devido ao facto da rede de Bragg reflectir as flutuações de potência da bomba de novo para a fibra, aumentando a intensidade do transiente. Por esse motivo, quando a intensidade da flutuação da bomba reflectida diminui, também o peso dessas flutuações será menor, aproximando-se o comportamento do amplificador com a rede de Bragg com o dos amplificadores tradicionais.

5.2 Técnica para Mitigar o Efeito Transiente em Amplificadores de Raman com Reflexão de Bomba

A configuração apresentada anteriormente traz vantagens a nível do aumento da eficiência do amplificador de Raman e na possibilidade de redução do ruído, visto que se pode reduzir a potência das bombas para obter o mesmo ganho que as configurações tradicionais. Infelizmente, esta configuração tem um comportamento pior que os amplificadores tradicionais quando ocorrem adições/remoções de sinais. Assim sendo, para usufruir das vantagens deste amplificador, torna-se necessário encontrar uma técnica que consiga mitigar o efeito transiente nos sinais sobreviventes.

Visto que um dos objectivos será aumentar a eficiência do amplificador, não fará sentido usar um método que restrinja o ganho do amplificador consumindo os recursos da bomba. Assim, os métodos de mitigação no domínio óptico estão excluídos [TNL03; GC07; MJGJ05]. Outro método será usar dispositivos eléctricos para monitorizar e controlar a potência das bombas [CYW⁺01; KM02b]. Tal é conseguido com a monitorização de sinais e com o uso de um sistema de controlo para controlar a potência das bombas. A implementação deste método implica a colocação de sinais que não transportarão informação e servirão apenas para monitorização, de forma a poderem ser detectadas as flutuações de potência nesses sinais. A implementação destes sinais tem elevados custos, desde o uso de um comprimento de onda que poderia ser usado para transmitir informação, até aos dispositivos ópticos que seriam necessários implementar para adicionar e retirar os sinais da fibra. Esta solução traz a vantagem de não restringir o ganho, não afectando a eficiência do amplificador. Uma desvantagem pode ser a complexidade dos algoritmos para controlar a potência da bomba e o custo de implementação. A este nível pretende-se desenvolver uma solução algo inovadora e de baixo custo.

O que se propõe, portanto, é aplicar uma técnica de mitigação usando as características particulares do amplificador com reflexão de bomba, permitindo implementar de uma forma simples e com um custo mais baixo, um sistema de mitigação do efeito transiente pelo controlo do ganho, com o ajuste da potência da bomba.

5.2.1 Técnica de Mitigação

O mote para esta solução é a simplicidade e baixo custo, de modo que possa ser de fácil implementação e ajuste. Usando uma técnica de mitigação que não restrinja o ganho.

Como se pode verificar na Figura 5.9, a construção deste amplificador e desta técnica de mitigação tem uma estrutura modular constituída por duas partes: a) rede de Bragg no início do amplificador, com reflectividade de aproximadamente 100 % no comprimento de onda da bomba, com todas as vantagens que daí advêm; b) constituído pelo sistema de monitorização, pelo controlador da potência das bombas e pelas bombas.

Na Figura 5.10, é apresentado um esquema mais pormenorizado da solução idealizada. De facto, esta configuração, além de aproveitar a energia da bomba re-injectando no sentido co-propagante, permite fazer com que a potência da bomba chegue novamente à saída do amplificador. Sendo o desmultiplexador (C₁) bidireccional, vai fazer com que, automaticamente, o comprimento de onda da bomba seja retirado da fibra de transmissão, fazendo-o sem

5.2. TÉCNICA PARA MITIGAR O EFEITO TRANSIENTE EM AMPLIFICADORES DE RAMAN COM REFLEXÃO DE BOMBA

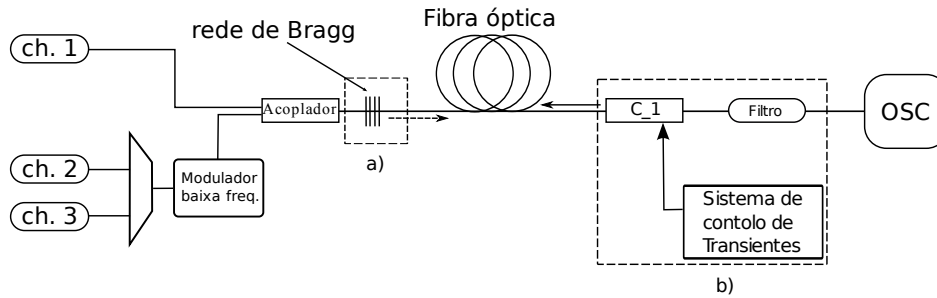


Figura 5.9: Diagrama esquemático de um amplificador contra-propagante com controlo de transientes

gastos adicionais. Implementa-se, em seguida, um circulador que vai permitir fazer chegar o comprimento de onda da bomba ao sistema de monitorização. Assim, é efectuada a monitorização do comportamento da bomba ao longo do tempo. Não é necessário, portanto, inserir mais canais para monitorizar o comportamento dos sinais, bastando monitorizar a bomba e usar essa informação para controlar eficazmente a potência da bomba.

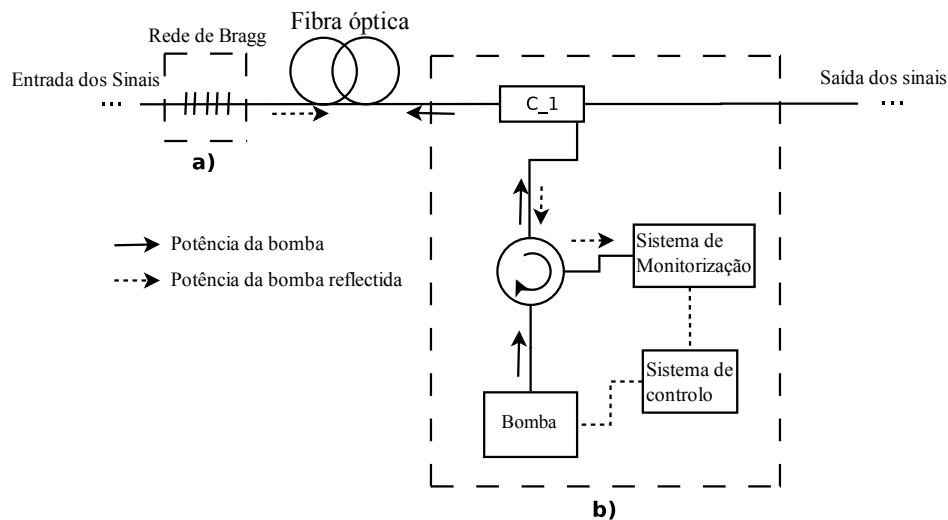


Figura 5.10: Diagrama do sistema de controlo

O facto de se retirar a informação do comportamento da própria bomba pode fazer com que os algoritmos de controlo sejam mais complexos. Note-se que o custo da solução será restringido pelo custo da rede de Bragg que precisa de ser de elevada qualidade, pelo circulador e por toda a electrónica necessária para monitorizar e controlar a potência da bomba. Todos os componentes ópticos terão de ter atenuações baixas, para aumentar a eficiência do sistema.

Com o aumento da complexidade do sistema, maior número de sinais ou maior número de bombas, é fundamental perceber se é necessário monitorizar as outras bombas, para continuar a ser possível controlar as flutuações de potência.

Como facilmente se verifica, a implementação desta solução não implica gastos de maior, permitindo aumentar o ganho e controlar a potência da bomba à saída do amplificador, de maneira a mitigar a adição/remoção de sinais de uma forma eficaz e de baixo custo.

5.2.2 Comportamento do Amplificador com Reflexão de Bomba e Controlo de Transientes

É necessário perceber se a técnica de mitigação apresentada pode efectivamente ser uma boa alternativa e poderá de alguma forma tornar este esquema de bombeamento viável para as redes ópticas dinâmicas futuras.

A implementação no simulador foi conseguida usando [KM02b]:

$$P_{pin}(t + dt) = P_{pin}(t) + C_p[P_{sur}(t) - P_{sur}(0)] + C_d \frac{d}{dt}[P_{sur}(t) - P_{sur}(0)], \quad (5.3)$$

onde P_{pin} é a potência de entrada da bomba, $P_{sur}(0)$ representa o valor estacionário da bomba quando todos os sinais estão a ser amplificados, C_d e C_p representam o ganho proporcional e o diferencial usados sistema de realimentação. A escolha de C_d e C_p é muito importante para conseguir uma eliminação rápida das flutuações de potência sem oscilações.

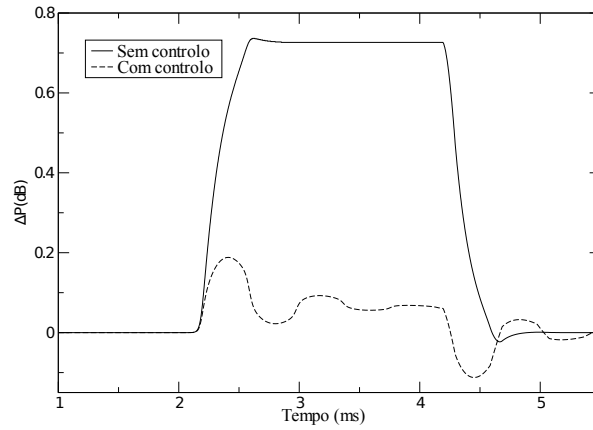


Figura 5.11: Variação de potência do sinal sobrevivente, 1550 nm, em função do tempo, com e sem a técnica de mitigação, para o amplificador contra-propagante com a rede de Bragg; $L_{SMF} = 40$ km; $\lambda_p = 1450$ nm; $P_{p,in} = 700$ mW; $\lambda_s = 1550$ nm, 1551 nm, 1552 nm; $P_{s,in} = 0$ dBm/sinal.

Estas condições fronteira foram implementadas no simulador já apresentado. Foram usados três sinais 1550 nm, 1551 nm, 1552 nm com 0 dBm por sinal. Uma bomba com 1450 nm e uma potência de entrada de 625 mW e uma rede de Bragg com o pico de reflexão no comprimento de onda da bomba. A fibra simulada foi uma SMF com 40 km. Na Figura 5.11 podemos observar o comportamento do amplificador com a técnica de mitigação ligada em comparação com um amplificador nas mesmas condições, mas com a técnica de mitigação desligada. As flutuações de potência do canal sobrevivente aquando da remoção e adição dos últimos dois sinais foi mantida abaixo dos 0.2 dB, mostrando que é possível mitigar as flutuações de potência nos sinais sobreviventes com a monitorização do comportamento da bomba.

Mostra-se, com base em simulações efectuadas, que esta técnica de mitigação efectivamente funciona. Talvez seja possível diminuir o intervalo em que os sinais sobreviventes podem

5.3. CONCLUSÃO

oscilar usando um algoritmo para otimizar as constantes C_d e C_p . Assim sendo, esta nova configuração tem potencial para ser aplicada em redes com encaminhamento a nível da camada óptica.

5.3 Conclusão

A utilização desta configuração usando redes de Bragg para aumentar a eficiência do amplificador obtém bons resultados no regime estacionário. O mesmo não se verifica a nível do regime dinâmico, isto porque, a variação da potência da bomba re-injectada ao longo do tempo, contribui para o aumento da intensidade dos transientes nos sinais sobreviventes, devido à adição/remoção dos sinais.

De facto, para ser possível tirar partido das vantagens do uso de uma rede de Bragg em redes ópticas dinâmicas, é necessário encontrar uma técnica de mitigação que permita controlar estas variações mais intensas de potência, de forma a que a informação transportada pelos sinais não se degrade. Apresentou-se uma adaptação a um princípio de mitigação já existente que traz muitas vantagens, nomeadamente, a nível de simplicidade e custo, permitindo usar as características de um amplificador com reflexão da potência da bomba para mitigar o efeito transiente. Com esta proposta, consegue-se aumentar a eficiência do amplificador sem por em causa a qualidade do sinal no regime dinâmico, colmatando a principal falha do amplificador com reflexão de bomba, a pior resposta do sistema aquando da adição/remoção de sinais.

CAPÍTULO 6

Conclusão

Neste capítulo apresentam-se as conclusões finais desta dissertação, bem como alguns tópicos para futuros desenvolvimentos.

6.1 Conclusões Finais

Neste trabalho procedeu-se ao desenvolvimento de um simulador numérico, capaz de representar o comportamento no regime dinâmico de um amplificador Raman. Teve-se o cuidado de implementar um simulador genérico, que pudesse ser facilmente adaptado para diferentes cenários de operação. O simulador foi validado com base em resultados obtidos experimentalmente para um amplificador contra-propagante, tendo-se obtido um bom acordo entre os resultados simulados e experimentais.

Com a ferramenta desenvolvida efectuaram-se várias simulações com o objectivo de estudar e compreender o comportamento do amplificador Raman em diferentes cenários de operação. Concluiu-se que o esquema de bombeamento e a potência da bomba, são factores a controlar, quando o objectivo é tentar reduzir a intensidade e aumentar o tempo de subida do efeito transiente.

Para ser possível diminuir a potência da bomba mantendo o mesmo ganho, é necessário aumentar a eficiência do amplificador Raman. Escolheu-se implementar uma rede de Bragg no amplificador Raman para atingir esse objectivo. Estudou-se esta nova configuração no regime dinâmico, percebendo-se que apesar da rede de Bragg aumentar a eficiência do amplificador e permitir diminuir a potência da bomba, no regime dinâmico, possui uma pior resposta à adição/remoção de sinais, quando comparado com os esquemas de bombeamento tradicionais.

Numa tentativa de colmatar a falha deste esquema de alimentação no regime dinâmico, desenvolveu-se e apresentou-se uma técnica de mitigação baseada no controlo da potência da bomba através da monitorização da própria bomba. Esta técnica foi implementada no simulador, tendo-se conseguido restringir as flutuações de potência abaixo dos 0.2 dB.

Como nota final refere-se o facto de neste trabalho ter sido apresentado uma nova configuração para um amplificador Raman eficiente e com controlo de transientes. Essa configuração

resultou da compreensão do efeito transiente, através de um estudo sistemático do comportamento deste em vários cenários de operação. Este trabalho será apresentado à comunidade científica através de um artigo a submeter ao Journal of Lightwave Technology.

6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Perante o trabalho desenvolvido, apresentam-se em seguida alguns tópicos que podem ser considerados em trabalhos futuros:

- Implementar a configuração proposta para o amplificador Raman com capacidade de mitigar o efeito transiente;
- Estudar experimentalmente o impacto da adição/remoção de canais na razão de erro de bit [*Bit-Error Ratio*] (BER) dos sinais, em diferentes cenários de operação;
- Avaliar o comportamento do transiente em amplificadores Raman com bombas incoerentes.

Bibliografia

- [Agr95] G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics*. Academic Press, 1995.
- [BMLW89] Foley B., Dakss M., Davies L., and Melman W. Gain saturation in fiber Raman amplifiers due to stimulated Brillouin scattering. *Journal of Lightwave Technology*, 7, December 1989.
- [BP04] G. Bolognini and F. Di Pasquale. Transient Effects in Gain-Clamped Discrete Raman Amplifier Cascade. *IEEE Photonics Technology Letters*, 16(1):66–68, January 2004.
- [Bro04] Jake Bromage. Raman Amplification for Fiber Communications Systems. *Journal of Lightwave Technology*, 22(1):79–93, January 2004.
- [CW01] Chien-Jen Chen and W.S. Wong. Transient effects in saturated Raman amplifiers. *Electronics Letters*, 37(6), March 2001.
- [CYW⁺01] C. J. Chen, J. Ye, W. S. Wong, W. Lu, Y. Cao, M. J. Gassner, J. S. Pease, H. S. Tsai, H. K. Lee, S. Cabot, and Y. Sun. Control of Transient Effects in Distributed and lumped Raman Amplifiers. *Electronic Letters*, 37(21):1304–1308, 2001.
- [FaDP07] S. Faralli and G. Bolognini and F. Di Pasquale. Design optimization of high power and low RIN lasers for efficient Raman co-pumping. *Conference on Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference, OFC/NFOEC*, pages 1–3, January 2007.
- [FP08] Meire C. Fugihara and Armando Nolasco Pinto. Low-Cost Raman Amplifier for CWDM Systems. *Microwave and Optical Technology Letters*, 50(2):297–301, February 2008.
- [GC] Johann Gest and Lawrence R. Chen. Comparison of two all-optical gain-clamping techniques for discrete fiber Raman amplifiers.
- [GC07] Johann Gest and Lawrence R. Chen. Impact of the all-optical gain-clamping technique on the transience characteristics of cascaded discrete fiber Raman amplifiers. *Optics Communications*, 273:138–148, November 2007.
- [Gra02] S. Gray. Transient Gain Dynamics in Wide Bandwidth Discrete Raman Amplifiers. *OFC 2002*, pages 512– 513, March 2002.

- [HS08] Michael Holtmannspotterötter and Bernhard Schmauss. Optical Power Transient Suppression by a Dynamic Broadband Attenuator Based on the Raman Effect. *OFC/NFOEC*, 2008.
- [KEN⁺01] S. Kado, Y. Emori, S. Namiki, N. Tsukiji, J. Yoshida, and T. Kimura. Broad-band flat-noise Raman Amplifier using low-noise bi-directionally pumping sources. *Proc. Europ. Conf. Optical Communications*, 2001.
- [KKHP04] M. Karásek, J. Kaňka, P. Honzátko, and P. Peterka. Time-domain simulation of power transients in Raman fibre amplifiers. *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, 17(2):165–176, 2004.
- [KM02a] M. Karásek and M. Menif. Channel Addition/Removal Response in Raman Fiber Amplifiers: Modeling and Experimentation. *Journal of Lightwave Technology*, 20(9):1680–1687, September 2002.
- [KM02b] M. Karásek and M. Menif. Protection of surviving channels in pump-controlled gain-locked Raman fibre amplifier. *Optics Communications*, 210:57–65, 2002.
- [KRN⁺99] Howard Kidorf, Karsten Rottwitt, Morten Nissov, Matthew Ma, and Eric Rarbarijaona. Pump Interactions in a 100-nm Bandwidth Raman Amplifier. *IEEE Photonics Technology Letters*, 11(2):530–532, May 1999.
- [KSC⁺07] Chul Han Kim, Eui Seung Son, Ho-Shin Cho, Young-Geun, Ju Han Lee, and Sang Bae Lee. Experimental study on the effect of codirectional Raman gain on system’s performance. *Optics Express*, 15(10):6146–6151, May 2007.
- [KVR07] M. Karásek, J. Vojtech, and J. Radil. Power Transients in a Cascade of Three Distributed Raman Fibre Amplifiers Transmitting 10x10 GE Channels over 383 km. *9th International Conference on Transparent Optical Network (ICTON '07)*, 1:144–149, July 2007.
- [LCH⁺05] Ju Han Lee, You Min Chang, Young Geun Han, Haeyang Chung, Sang Hyuck Kim, and Sang Bae Lee. A Detailed Experimental Study on Single-Pump Raman/EDFA Hybrid Amplifiers: Static, Dynamic, and System Performance Comparison. *Journal of Lightwave Technology*, 23(11):3484–3493, November 2005.
- [MJGJ05] Karásek M., Kaňka J., Khan G.R., and Radil J. Design of all-optical gain-clamped lumped Raman fibre amplifier for optimal dynamic performance. *IEE Proceedings-Optoelectronics*, 152(4):223–229, August 2005.
- [MJL⁺07] Karásek M., Kaňka J., Boháč L., Krčmařík D., Radil J., and Vojtěch J. Surviving-Channel-Power Transients in Second-Order Pumped Lumped Raman Fiber Amplifier: Experimentation and Modeling. *Journal of Lightwave Technology*, 25(3):664 – 672, March 2007.
- [MLP00] Bumki Min, Won Jae Lee, and Namkyoo Park. Efficient Formulation of Raman Amplifier Propagation Equations with Average Power Analysis. *IEEE Photonics Technology Letters*, 12(11), November 2000.

BIBLIOGRAFIA

- [Nic03] J. W. Nicholson. Dispersion Compensating Raman Amplifiers With Pump Reflectors for Increased Efficiency. *Journal of Lightwave Technology*, 21(8):1758–1762, August 2003.
- [PGKV07] S. Pachnicke, E. Gottwald, P. Krummrich, and E. Voges. Combined Impact of Raman and EDFA Transients on Long Haul Transmission System Performance. *European Conference on Optical Communication (ECOC 2007)*, September 2007.
- [TNL03] Zambelis T., Grypolakis N., and Chen L.R. Design of all-optical gain-clamped discrete fiber raman amplifiers. *Lasers and Electro-Optics Society, 2003. LEOS 2003. The 16th Annual Meeting of the IEEE*, 2:1050–1051, October 2003.
- [WHY03] L. L. Wang, B. C. Hwang, and L. M. Yang. Gain Transients in Copumped and Counterpumped Raman Amplifiers. *IEEE Photonics Technology Letter*, 15(5):664–666, May 2003.
- [ZHS03] Tong Z., Wei H., and Jian S. Transient Responses to Slowly Varying Input Waveforms in Backward Pumped Raman Amplifiers. *Optics Communications*, 218(1):105–111, March 2003.
- [ZMM05] Xiang Zhou, Feuer M., and Birk M. Submicrosecond Transient Control for a Forward-Pumped Raman Fiber Amplifier. *IEEE Photonics Technology Letters*, 17(10):2059–2061, October 2005.